

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Igor Vukres

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić, dipl. ing.

Student:

Igor Vukres
0035164709

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svima koji su mi pružili podršku u izradi ovog rada, uključujući kolege s fakulteta i asistente iz laboratorija za Motore i vozila, te kolege iz CVH. Pri pisanju rada mi je korisne savjete dao asistent Petar Ilinčić, te mu se ovim putem zahvaljujem. Posebno se zahvaljuem svojem mentoru, Zoranu Luliću, bez kojeg izrada ovog rada ne bi bila moguća, te svojoj obitelji koja je imala neizmjereno strpljenje za mene i omogućila mi studiranje na ovome fakultetu

Igor Vukres



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Igor Vukres**

Mat. br.: 00 35164709

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Emisije motornih vozila pogonjena ukapljenim naftnim plinom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Emissions of Motor Vehicles Propelled by Liquefied Petroleum Gas**

Opis zadatka:

U Republici Hrvatskoj za vozila pogonjena ukapljenim naftnim plinom (engl. *Liquefied Petroleum Gas* – *LPG*) nije obavezno ispitivanje sustava za naknadnu obradu ispušnih plinova Eko test na redovitom tehničkom pregledu vozila, a ta vozila na jednak način sudjeluju u prometu kao i sva ostala vozila pogonjena motorima s unutarnjim izgaranjem. Budući da se podaci o njihovim emisijama i ispravnosti sustava za naknadnu obradu ispušnih plinova nigdje ne evidentiraju i obrađuju, cilj rada je provjeriti kakav je njihov utjecaj na okoliš.

U radu treba:

- objasniti razliku između pogona motora s unutarnjim izgaranjem sljedećim gorivima:
 - ukapljenim naftnim plinom, UNP-om (engl. *Liquefied Petroleum Gas*, *LPG*),
 - stlačenim prirodnim plinom, SPP-om (engl. *Compressed Natural Gas*, *CNG*),
 - bioplinom (engl. *biogas*),
 - ukapljenim prirodnim plinom UPP-om (engl. *Liquefied Natural Gas*, *LNG*),
- navesti razlike pri uporabi plinovitih goriva kod Ottovih i Dieslovih motora,
- napraviti kratak opis i navesti razlike u sastavu navedenih plinova, te sastav ispušnih plinova pri izgaranju istih. Opis popratiti odgovarajućim proračunom izgaranja za svaki od navedenih plinova.

U okviru diplomskog rada cilj je napraviti ispitivanje emisija vozila prerađenih na pogon plinom uz pomoć tvrtke Centar za vozila Hrvatske pri redovitom tehničkom pregledu vozila u njihovim stanicama za tehnički pregled na određenom broju automobila. Ispitivanje emisija provodilo bi se na dva načina – pri pogonu UNP-om i pri pogonu benzinom.

Paralelno s opisanim mjerenjem u programskom paketu Copert treba napraviti procjenu utjecaja vozila pogonjenih UNP-om na ukupnu emisiju, a taj utjecaj nakon toga normirati udjelom tih vozila u voznom parku RH.

Pomoću modificiranog analizatora ispušnih plinova za mjerenje emisija iz motora s unutarnjim izgaranjem, koji omogućuje kontinuirano mjerenje ispušnih plinova, provesti mjerenje na jednom ili više vozila pogonjenih plinom prvo u Laboratoriju za motore i vozila FSB-a u mirovanju vozila, te u stvarnim uvjetima vožnje.

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu diplomskoga rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

5. svibnja 2016.

7. srpnja 2016.

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

POPIS KRATICA.....	III
SAŽETAK	IV
1. UVOD	1
1.1. POPULARNOST VOZILA POGONJENIH PLINOM	1
1.2. VRSTE PLINOVA ZA POGON MOTORNIH VOZILA	3
1.3. KEMIJSKI SASTAV PLINOVA ZA POGON MOTORNIH VOZILA.....	3
1.3.1 <i>Ukapljeni naftni plin (UNP/LPG).....</i>	<i>3</i>
1.3.2 <i>Prirodni plin i bioplin (SPP/CNG, UPP/LNG)</i>	<i>8</i>
1.4. IZGARANJE PLINOVA ZA POGON MOTORNIH VOZILA I EMISIJE NJIHOVIH ISPUŠNIH PLINOVA	11
2. MOTORI POGONJENI PLINOM.....	15
2.1. VOZILA NA UKAPLJENI NAFTNI PLIN	15
2.2. VOZILA NA PRIRODNI PLIN (NGV).....	16
2.3. OPIS POTREBNIH UREĐAJA U VOZILU POGONJENOM PLINOM.....	16
2.3.1 <i>Bivalentni ili bi-fuel Ottov motor pogonjen UNP-om ili SPP-om.....</i>	<i>16</i>
2.3.2 <i>Dual-fuel Diesellov motor pogonjen SPP-om</i>	<i>19</i>
2.3.3 <i>Dual-fuel Diesellov motor pogonjen UPP-om ili UNP-om</i>	<i>20</i>
2.4. PREINAKE NA MOTORIMA	21
2.5. PREDNOSTI I NEDOSTACI.....	21
3. ANALIZA U PROGRAMSKOM PAKETU COPERT	23
3.1. ŠTO JE TO COPERT?	23
3.2. PODACI POTREBNI ZA ANALIZU U COPERT-U	23
3.3. REZULTATI ANALIZE U COPERT-U	25
3.4. UDIO EMISIJA ŠTETNIH TVARI PREMA VRSTI POGONA.....	32
4. ISPITIVANJE VOZILA U CVH.....	34
4.1. OPIS ISPITIVANJA	34
4.2. ANALIZA IZMJERENIH VRIJEDNOSTI PRI ISPITIVANJU	41
4.2.1 <i>Utjecaj opterećenja motora i vrste goriva na emisije ispušnih plinova</i>	<i>41</i>
4.2.2 <i>Utjecaj razine ograničenja na emisije ispušnih plinova</i>	<i>45</i>
4.2.3 <i>Utjecaj starosti i prijeđenog puta vozila na emisije ispušnih plinova</i>	<i>47</i>
4.2.4 <i>Analiza prolaznost ispitivanih vozila na Eko testu</i>	<i>49</i>
5. ZAKLJUČAK.....	50
6. POPIS LITERATURE	52

POPIS SLIKA

<i>Slika 1. Dijagram ovisnosti tlaka para UNP-a o temperaturi za razne udjele propana i butana u mješavini UNP-a [13]</i>	6
<i>Slika 2. Prikaz potrebnih uređaja u osobnom vozilu sa bi-fuel motorom pogonjenim UNP-om i benzinom [23]</i>	16
<i>Slika 3. Prikaz potrebnih uređaja u osobnom vozilu sa bi-fuel motorom pogonjenim SPP-om i benzinom [23]</i>	18
<i>Slika 4. Prikaz potrebnih uređaja u vozilu sa dual-fuel motorom pogonjenim SPP-om i dizelskim gorivom [25]</i>	19
<i>Slika 5. Prikaz potrebnih uređaja u vozilu sa dual-fuel motorom pogonjenim UPP-om i dizelskim gorivom [27]</i>	20
<i>Slika 6. Prikaz udjela registriranih vozila kategorije M1 prema vrsti pogona u RH 2015. god.</i>	23
<i>Slika 7. Prikaz udjela registriranih vozila kategorije M1 prema vrsti pogona i ograničenju emisija štetnih tvari u RH 2015. god.</i>	24
<i>Slika 8. Prikaz udjela registriranih vozila kategorije M1 prema vrsti vozila pogonjenih plinovitim gorivima u RH 2015. god.</i>	24
<i>Slika 9. Prikaz udjela vozila kategorije M1 prema razini emisija štetnih tvari u RH 2015. god.</i>	25
<i>Slika 10. Emisije CO₂ pri vožnji s uključenim i isključenim klima uređajem</i>	26
<i>Slika 11. Emisije dušikovih spojeva NO, NO₂, N₂O i NH₃</i>	26
<i>Slika 12. Emisije ugljikovodika</i>	27
<i>Slika 13. Emisije krutih čestica</i>	28
<i>Slika 14. Emisije teških metala</i>	29
<i>Slika 15. Prosječne emisije CO iz vozila kategorije M1 prema vrsti pogona i razini emisija štetnih tvari</i>	29
<i>Slika 16. Prosječne emisije HC iz vozila kategorije M1 prema vrsti pogona i razini emisija štetnih tvari</i>	30
<i>Slika 17. Prosječne emisije NO_x iz vozila kategorije M1 prema vrsti pogona i razini emisija štetnih tvari</i>	30
<i>Slika 18. Prosječne emisije PM iz vozila kategorije M1 prema vrsti pogona i razini emisija štetnih tvari</i>	31
<i>Slika 19. Prosječne emisije CO₂ iz vozila kategorije M1 prema vrsti pogona i razini emisija štetnih tvari</i>	31
<i>Slika 20. Prosječne emisije CO i HC jednog osobnog vozila kategorije M1 prema vrsti pogona</i>	32
<i>Slika 21. Prosječne emisije PM i CO₂ jednog osobnog vozila kategorije M1 prema vrsti pogona</i>	32
<i>Slika 22. Prosječne emisije NO_x i CH₄ jednog osobnog vozila kategorije M1 prema vrsti pogona</i>	33
<i>Slika 23. Prikaz broja ispitivanih vozila prema mjestu registracije</i>	35
<i>Slika 24. Prikaz broja ispitivanih vozila prema proizvođaču vozila</i>	35
<i>Slika 25. Analizator ispušnih plinova proizvođača Bosch tip BEA [34]</i>	36
<i>Slika 26. Spajanje stezaljki</i>	37
<i>Slika 27. Umetanje osjetnika temperature u karter ulja</i>	37
<i>Slika 28. Umetanje sonde za uzimanje uzoraka u ispušnu cijev vozila</i>	38
<i>Slika 29. Zagrijavanje motora, odnosno katalizatora na radnu temperaturu</i>	38
<i>Slika 30. Mjerenje emisija pri praznom hodu</i>	39
<i>Slika 31. Mjerenje emisija pri povišenom hodu</i>	39
<i>Slika 32. Prikaz svih dobivenih vrijednosti mjerenih emisija pri ispitivanju jednog vozila</i>	40
<i>Slika 33. Prosječne izmjerene vrijednosti pri povišenom hodu pri pogonu benzinom</i>	41
<i>Slika 34. Prosječne izmjerene vrijednosti pri praznom hodu pri pogonu benzinom</i>	42
<i>Slika 35. Prosječne izmjerene vrijednosti pri povišenom hodu pri pogonu UNP-om</i>	42
<i>Slika 36. Prosječne izmjerene vrijednosti pri praznom hodu pri pogonu UNP-om</i>	42
<i>Slika 37. Prosječne izmjerene vrijednosti CO jednog vozila prema vrsti goriva, opterećenju motora i razini ograničenja</i>	43
<i>Slika 38. Prosječne izmjerene vrijednosti CO₂ jednog vozila prema vrsti goriva, opterećenju motora i razini ograničenja</i>	43
<i>Slika 39. Prosječne izmjerene vrijednosti HC jednog vozila prema vrsti goriva, opterećenju motora i razini ograničenja</i>	44
<i>Slika 40. Udio emisija štetnih tvari jednog vozila prema vrsti pogona (Euro 2, 3, 4 i 5)</i>	44
<i>Slika 41. Prosječna emisija CO jednog vozila prema razini ograničenja</i>	45

<i>Slika 42. Prosječna emisija CO₂ jednog vozila prema razini ograničenja</i>	46
<i>Slika 43. Prosječna emisija HC jednog vozila prema razini ograničenja</i>	46
<i>Slika 44. Dijagram ovisnosti starosti i prijeđenog puta svih ispitivanih vozila</i>	47
<i>Slika 45. Prosječna emisija CO prema starosti vozila</i>	47
<i>Slika 46. Prosječna emisija CO₂ prema starosti vozila</i>	48
<i>Slika 47. Prosječna emisija HC prema starosti vozila</i>	48

POPIS TABLICA

<i>Tablica 1. Granične vrijednosti dopuštenih emisija štetnih tvari za osobna vozila (kategorija M1)[6]</i>	2
<i>Tablica 2. Prikaz plinova korištenih za pogon motornih vozila</i>	3
<i>Tablica 3. Prikaz klasifikacije UNP-a [14]</i>	5
<i>Tablica 4. Prikaz sastava UNP-a u Europi [5]</i>	5
<i>Tablica 5. Svojstva propana i butana prema normi EN 589 [14]</i>	7
<i>Tablica 6. Svojstva UNP-a</i>	7
<i>Tablica 7. Kemijski sastav prirodnog plina u Hrvatskoj, mol % [17]</i>	9
<i>Tablica 8. Svojstva SPP-a</i>	9
<i>Tablica 9. Svojstva UPP-a</i>	10
<i>Tablica 10. Približne energetske vrijednosti nekih goriva pri izgaranju</i>	11
<i>Tablica 11. Usporedba odnosa energetskih sadržaja raznih goriva</i>	13
<i>Tablica 12. Usporedba goriva prema potrošnji i cijeni</i>	14
<i>Tablica 13. Broj vozila prema razini ograničenja, godini proizvodnje i prijeđenom putu</i>	34
<i>Tablica 14. Dopuštene izmjerene emisije CO za vozila opremljena katalizatorom [35]</i>	49
<i>Tablica 15. Dopuštene izmjerene emisije CO za vozila bez katalizatora [35]</i>	49
<i>Tablica 16. Prikaz prolaznosti ispitivanih vozila na Eko testu</i>	49

POPIS KRATICA

CVH	- Centar za vozila Hrvatska
FSB	- Fakultet strojarstva i brodogradnje
PM	- Krute čestice (engl. <i>Particulate matter</i>)
PN	- Broj krutih čestica (engl. <i>Particulate number</i>)
PAH	- Policiklički aromatski ugljikovodici (engl. <i>Polycyclic aromatic hydrocarbons</i>)
HC	- Ugljikovodici (engl. <i>Hydrocarbons</i>)
NGV	- Vozilo pogonjeno prirodnim plinom (engl. <i>Natural gas vehicle</i>)

SAŽETAK

Tema ovog rada su emisije ispušnih plinova motornih vozila pogonjenima plinom, te njihov utjecaj na okoliš, a ponajprije na osobnim vozilima (M1 kategorija) pogonjenim ukapljenim naftnim plinom (UNP). U radu su dati kratki opisi rada motora s unutarnjim izgaranjem pogonjenih plinovima koji se trenutno najviše koriste na hrvatskom, ali i svijetskom tržištu. Budući da se podaci o emisijama štetnih tvari i o ispravnosti sustava za naknadnu obradu ispušnih plinova ovakvih vozila nigdje u RH ne evidentiraju niti obrađuju, jer ne postoji zakonska osnova za to, cilj istraživanja je provjeriti kakav je njihov utjecaj na okoliš. Naime, takva vozila nisu u RH obvezna prolaziti Eko test pri redovitom tehničkom pregledu.

U radu su objašnjene vrste pogonskih plinova koje postoje i koje se koriste u Republici Hrvatskoj, njihovi sastavi, sastavi emisija pri izgaranju istih, prednosti i nedostaci, te ostale bitne značajke vezane za motorna vozila pogonjena plinom.

U planu rada je bilo provesti dva različita ispitivanja vozila, jedno od strane CVH (Centar za vozila Hrvatske), te drugo od strane Laboratorija za motore i vozila na FSB-u. Nažalost, zbog kratkog vremenskog roka, ispitivanje na FSB-u nije uspješno provedeno. Provedena ispitivanja od strane CVH su u suštini mjerenje emisija ispušnih plinova iz vozila pogonjenima UNP-om, te obrada dobivenih podataka. Posebno su interesantni podaci vezani na povijesne podatke. Pod time se misli na procjenu emisija u ovisnosti o prijašnjem putu vozila, odnosno starosti vozila. Očekuje se da će se iz analize rezultata moći utvrditi kakav utjecaj ima starost vozila pogonjenih UNP-om na emisije vozila.

Kao prilog analizi ovog problema napravljena je analiza u programskom paketu *Copert*, koja prikazuje koliki utjecaj imaju ta vozila na ukupnu emisiju vozila u RH. Podaci o strukturi vozila potrebnih za takvu analizu su također dobiveni iz CVH, što pokazuje da je njihova pomoć bila od iznimnog značaja za nastanak ovog rada.

Ključne riječi: motori s unutarnjim izgaranjem, motorna vozila pogonjena plinom, ukapljeni naftni plin (UNP/LPG), *Copert*, mjerenje emisija ispušnih plinova

SUMMARY

This thesis outlines exhaust gas emissions of motor vehicles powered by gaseous fuels and their impact on the environment, especially on passenger vehicles (M1 category) powered by liquefied petroleum gas (LPG). The paper gives a brief description of internal combustion engines powered by most commonly used gaseous fuels on the Croatian and global market. Since the data about emissions and proper functioning of exhaust gas after treatment systems for such vehicles is not registered nor processed in Croatia, as there is no legal basis for it, the goal of the research is to check their impact on the environment. In fact, in Croatia such vehicles are not required to pass the Eco test during regular technical inspection of the vehicle.

In the thesis are descriptions of existing types of gaseous fuels that are used in Croatia, their compositions, compositions of their emissions produced by combustion, advantages and disadvantages of gaseous fuels and other important features related to motor vehicles powered by such fuels.

The plan was to conduct two different vehicle tests, one by the Croatian Vehicle Centre (CVH), and the other by the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb (FSB) in their Laboratory for engines and vehicles. Unfortunately, due to a short period of available time, the test by FSB was not successfully conducted. The conducted tests by CVH are essentially measuring of exhaust gas emissions of vehicles powered by LPG, and processing of the resulting data. Particularly interesting are the data related to historical data. This refers to emissions evaluations depending on vehicle's mileage, respectively vehicle's age. It is expected that the results of the analysis will be able to determine what impact does the age of vehicles powered by LPG have on vehicle's emissions.

As a theoretical approach to this problem, an analysis has been made in a software package named Copert, whose analysis shows what impact these vehicles have on the total emissions of passenger vehicles in Croatia. Data about the vehicle structure in Croatia necessary for this analysis was obtained also from the CVH, which shows that their participation was of significant help for the making of this thesis.

Keywords: internal combustion engines, motor vehicles powered by gaseous fuels, liquefied petroleum gas (LPG), Copert, exhaust gas emission measurements

1. Uvod

1.1. Popularnost vozila pogonjenih plinom

Danas se pridaje velika pozornost problemu onečišćenja okoliša na lokalnoj i globalnoj razini. Vrlo su bitni problemi onečišćenja zraka polutantima koji uzrokuju razne zdravstvene probleme, te naravno sve osjetnije globalno zagrijavanje. U autoindustriji se zbog toga ograničavaju emisije ispušnih plinova koje vozila stvaraju izgaranjem fosilnih goriva. Fosilna goriva poput benzina i dizelskog goriva sastoje se pretežito od ugljikovodika, te kao takva izgaranjem stvaraju ugljični dioksid (CO_2) i vodenu paru (H_2O), no i niz produkata nepotpunog izgaranja, npr. CO, HC, NO_x , PM, policikličke aromatske ugljikovodike (PAH)...

Zakonom, odnosno odgovarajućim pravilnicima, su propisane dozvoljene emisije ispušnih plinova iz vozila za sljedeće štetne tvari:

- Ugljični monoksid, CO
- Ugljikovodici, HC
- Dušikovi oksidi, NO_x
- Krute čestice, PM, PN
- Nemetanski ugljikovodici, NMHC

Uz to je ograničena i neprozirnost ispušnih plinova, zacrnjenje ispuha, te količina hlapivih tvari iz vozila [1].

Također je značajan utjecaj stakleničkih plinova, pa je bitno smanjiti i emisije ugljičnog dioksida (CO_2) i metana (CH_4). Cestovna vozila emitiraju 12 % ukupne emisije CO_2 u Europskoj uniji [2]. Stoga je Europska komisija svim proizvođačima automobila propisala ograničenje emisija istog. Flota novih automobila svakog proizvođača mora zadovoljiti ograničenje od 95 grama CO_2 po kilometru do 2021. godine [2].

Da bi se ove emisije štetnih tvari značajno smanjile potrebna je zamjena konvencionalnih fosilnih goriva sa gorivima koja izgaraju čišće i potpunije, tzv. alternativnim gorivima. Postoji niz takvih goriva, te se sve više radi na otkrivanju novih i boljih goriva za okoliš. Prirodni i naftni plin, te bioplin su jedno od takvih rješenja jer se sastoje od jednostavnijih komponenti ugljikovodika u odnosu na benzinsko i dizelsko gorivo, pa bi prema tome trebala izgarati čišće, barem u teoriji. Osim toga bioplin se može proizvesti iz biomase, što ga čini obnovljivim izvorom energije.

Upotreba ukapljenog naftnog plina za pogon motornih vozila s Ottovim motorima je u zadnjih desetak godina postala vrlo popularna, te se sve više i više ljudi odlučuje na takve vrste vozila, kako u Hrvatskoj, tako i diljem svijeta. Najviše vozila je naknadno prenamijenjeno za pogon plinom, no proizvođači automobila izbacuju na tržište sve više i više serijskih modela sa već ugrađenim plinskim pogonom. Doduše, Hrvatska je malo tržište i nije ipak toliko razvijeno u tom pogledu kao neke susjedne zemlje, poput Italije, koja prednjači u

broju vozila u Europi pogonjenih nekom vrstom plina. To i ne čudi pošto autoprodušač Fiat nudi nekoliko modela na plinski pogon, te je Italija vrlo razvijena što se tiče vlastite proizvodnje prirodnog i naftnog plina.

Prelazak sa konvencionalnog goriva na plin, osim što mogu smanjiti emisije nekih štetnih tvari [3], ima i svoju računicu, jer se nakon par godina početna investicija vraća i od tada ušteda na gorivu samo raste [4].

Povećanjem broja ovakvih vozila na cesti raste naravno i razvoj infrastrukture potrebne za korištenje istih na masovnoj skali. Tako je u Hrvatskoj trenutno oko 390 punionica ukapljenog naftnog plina [5]. Isto se nažalost ne može reći i za punionice prirodnog plina, bilo to stlačenog ili ukapljenog, jer u Hrvatskoj postoje samo dvije punionice prirodnog plina. Jedna se nalazi u Zagrebu, a druga u Rijeci, te najvećim dijelom služe za opskrbu autobusa gradskog prijevoza SPP-om.

Tablica 1. Granične vrijednosti dopuštenih emisija štetnih tvari za osobna vozila (kategorija M1)[6]

Razina ograničenja	Datum stupanja na snagu	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM	PN
		g/km					#/km
Kompresijsko paljenje (Diesel)							
Euro 1	1992, srpanj	2,72	-	0,97	-	0,14	-
Euro 2, IDI	1996, siječanj	1,0	-	0,7	-	0,08	-
Euro 2, DI	1996, siječanj	1,0	-	0,9	-	0,1	-
Euro 3	2000, siječanj	0,64	-	0,56	0,5	0,05	-
Euro 4	2005, siječanj	0,5	-	0,3	0,25	0,025	-
Euro 5a	2009, rujan	0,5	-	0,23	0,18	0,005 ^c	-
Euro 5b	2011, rujan	0,5	-	0,23	0,18	0,005 ^c	6,0×10 ¹¹
Euro 6	2014, rujan	0,5	-	0,17	0,08	0,005 ^c	6,0×10 ¹¹
Paljenje iskrom (Otto)							
Euro 1	1992, srpanj	2,72	-	0,97	-	-	-
Euro 2	1996, siječanj	2,2	-	0,5	-	-	-
Euro 3	2000, siječanj	2,3	0,2	-	0,15	-	-
Euro 4	2005, siječanj	1,0	0,1	-	0,08	-	-
Euro 5	2009, rujan	1,0	0,1 ^a	-	0,06	0,005 ^{b,c}	-
Euro 6	2014, rujan	1,0	0,1 ^a	-	0,06	0,005 ^{b,c}	6,0×10 ^{11 b,d}
a. NMHC = 0,068 g/km							
b. Vrijedi samo za motore s direktnim ubrizgavanjem (DI)							
c. 0,0045 g/km koristeći PMP metodu mjerenja							
d. 6,0×10 ¹² 1/km unutar prve 3 godine od datuma stupanja na snagu Euro 6 norme							

U M1 kategoriju vozila spadaju motorna vozila za prijevoz osoba koja osim sjedala za vozača imaju još najviše 8 sjedala.

1.2. Vrste plinova za pogon motornih vozila

Postoji nekoliko plinova koji se koriste za pogon motornih vozila, a definitivno najrašireniji i najpoznatiji je ukapljeni naftni plin (UNP), odnosno međunarodno poznat kao LPG (engl. *Liquefied Petroleum Gas*), kako u Europi, tako i u Hrvatskoj. No, to dakako nije jedini plin koji se koristi kao pogonsko gorivo motora s unutarnjim izgaranjem, a u tablici 2 navedeni su plinovi korišteni za pogon motornih vozila u Republici Hrvatskoj.

Tablica 2. Prikaz plinova korištenih za pogon motornih vozila

Hrvatski naziv	Kratica/Simbol	Engleski naziv	Kratica/Simbol
Ukapljeni naftni plin	UNP	Liquefied Petroleum Gas	LPG
Stlačeni prirodni plin	SPP	Compressed Natural Gas	CNG
Ukapljeni prirodni plin	UPP	Liquefied Natural Gas	LNG
Bioplin	-	Biogas	-

Postoje i drugi plinovi, poput vodika, no on u ovom trenutku ima više nedostataka nego prednosti, te se radi o tehnologijama u razvoju koje će ozbiljniju primjenu možda naći tek u budućnosti. S obzirom da u Hrvatskoj za spomenute plinove ne postoji ni tržište, u ovom će radu fokus ipak biti na plinovima navedenim u prethodnoj tablici, a ponajprije UNP-u.

Doduše, u Hrvatskoj ne postoji niti jedno vozilo pogonjeno UPP-om, no u radu će se ukratko obraditi jer svjetski trendovi ipak idu u prilog potencijalu ove tehnologije. Primjerice Kina, zemlja sa najvećim brojem vozila pogonjenih prirodnim plinom, ima u svojem voznom parku preko 100.000 vozila pogonjenih UPP-om [7].

Kako bismo mogli analizirati ove plinove i njihove emisije, moramo znati njihov kemijski sastav. Kemijski sastavi plinova za pogon motornih vozila mogu varirati i ovisiti o nizu faktora, npr. podneblju u kojem se koriste, godišnjem dobu, proizvođaču plina itd. U nastavku će biti dani opći kemijski sastavi spomenutih plinova, kakvi se u većini slučajeva mogu naći na tržištu.

1.3. Kemijski sastav plinova za pogon motornih vozila

1.3.1 Ukapljeni naftni plin (UNP/LPG)

Ukapljeni naftni plin u svijetu se koristi najviše u kućanstvima koja nemaju pristup prirodnom plinu i to za kuhanje, grijanje, hlađenje, te u industriji za razne svrhe, no ujedno je i najkorišteniji plin za pogon vozila, pa se često naziva i **autoplinom**. Sastav UNP-a bitno ovisi o geografskom položaju, odnosno podneblju, godišnjem dobu, te proizvođaču, odnosno distributeru plina. Ovisno gdje se koristi u svijetu, UNP može označavati propan, butan ili kada govorimo o upotrebi u automobilima kao pogonsko gorivo, najčešće mješavinu ova dva plina.

Dakle, UNP je mješavina ugljikovodika, u najvećoj mjeri propana (C_3H_8) i butana (C_4H_{10}), no osim njih, mogu se u manjim koncentracijama naći i neki drugi ugljikovodici poput propilena, butilena i drugih. Pošto je UNP plin bez boje i mirisa, zbog sigurnosnih razloga se u njega dodaju odoranti poput etan-etiola ili etil-merkaptana, kako bi se lakše prepoznalo curenje plina. To se radi iz dva razloga; UNP je teži od zraka, te se pri curenju iz spremnika može skupljati u garaži, podrumu ili nekom drugom zatvorenom prostoru, što pak može uzrokovati gušenje ili dovesti do eksplozije.

Plin nije otrovan, ali udisanje velike koncentracije može uzrokovati glavobolju, pospanost pa čak i nesvjesticu, što zbog nedostatka kisika može dovesti do gušenja [8]. Ipak, puno veća opasnost prijeti od zapaljenja smjese koja se skupi u većoj količini jer je ovaj plin ekstremno zapaljiv, te vrlo lako može doći do eksplozije.

Naftni plin je pri atmosferskom tlaku i normalnoj temperaturi u plinovitom stanju, no da bi se ukapljio potrebno ga je komprimirati. Tlak u spremniku, ovisno o sastavu plina, obično se kreće između 7 i 10 bara [9], a makimalan tlak pri temperaturi od 65 °C iznosi 17 bara [10]. Ovisnost tlaka i temperature se može vidjeti na dijagramu sa slike 1.

Dolazak u kontakt s komprimiranim plinom predstavlja opasnost od smrzotina [8]. Dakle, komprimiranje naftnog plina rezultira ukapljivanjem istog, a do ukapljivanja bi došlo i da mu smanjimo temperaturu, no u tehnološkom smislu je znatno jednostavnije stlačiti plin nego ga ohladiti i održavati tu temperaturu. Kada bi ta kapljevina iz nekog razloga počela curiti iz spremnika, cijevi ili neke druge komponente na vozilu, ona bi naglo isparila uzimajući okolnu toplinu, a ukoliko bi došla u kontakt s kožom, time bi uzrokovala smrzotine.

Ukapljeni naftni plin je sekundarni produkt koji može nastati na dva načina. Jedan je izdvajanjem butana i propana iz sirovog prirodnog plina (zemni plin) dobivenog crpljenjem iz zemlje, a drugi je rafinerijskim postupcima prerade nafte.

U Europi je propisana norma EN 589 prema kojoj se UNP klasificira u 5 razreda ovisno o temperaturi, podneblju i razdoblju godine zbog osiguravanja minimalnog tlaka para od 150 kPa tijekom cijele godine. Podjela prema klasama se može vidjeti u tablici 3.

Kada pričamo o UNP-u namjenjenom za pogon vozila u Hrvatskoj, tada pričamo o mješavini propana i butana u postotcima između 40/60 i 60/40, gdje je udio propana manji u ljetnim mjesecima, a veći u zimskim [11].

Propan ima nisku točku vrelišta, pa je pogodniji za hladnije klime. Isparava na -42°C pri atmosferskom tlaku, za razliku od butana koji isparava na približno 0°C pri atmosferskom tlaku. To znači da zimi, kada su temperature vrlo niske, postoji dobra šansa da butan ne ispari pri pokretanju hladnog motora, te onemogućiti pokretanje motora.

U tablici 4 mogu se vidjeti varijacije sastava UNP-a za velik broj europskih zemalja. Tablicu treba uzeti sa zadržkom, pošto se gorivo može razlikovati od stanice do stanice, te od proizvođača do proizvođača. Unatoč tome, iz tablice se može dobiti okvirna slika stanja u Europi.

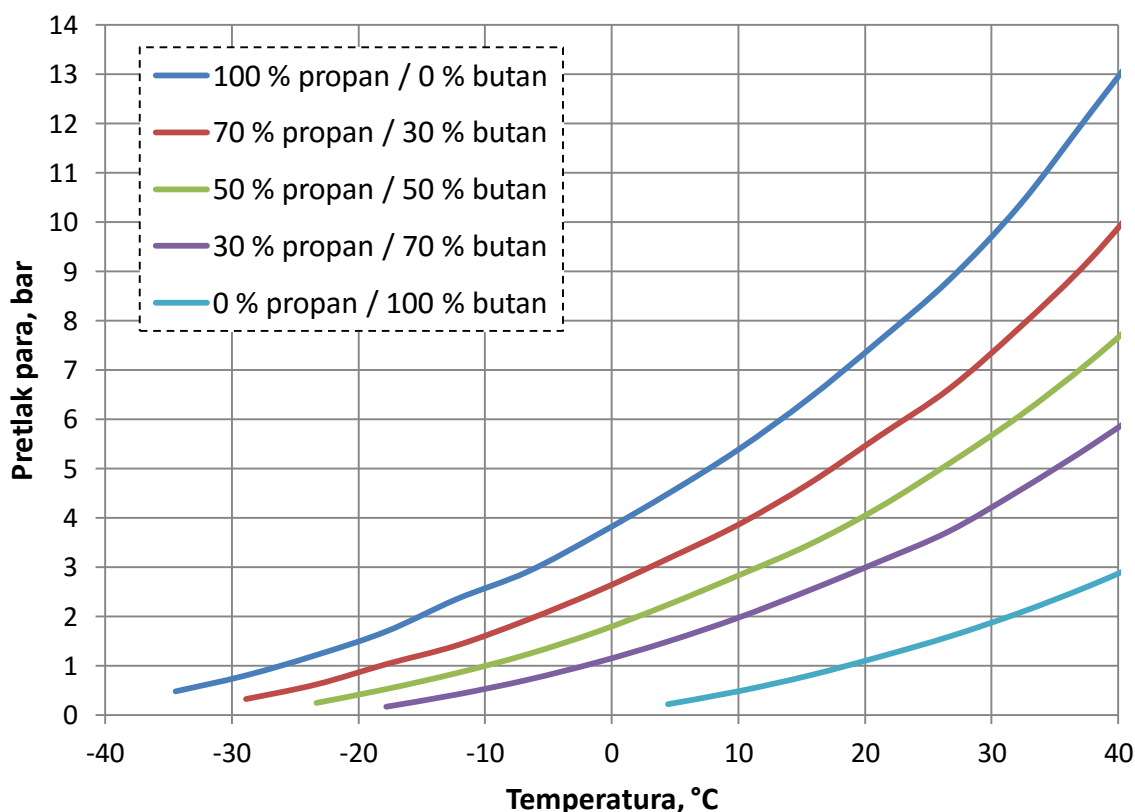
Tablica 3. Prikaz klasifikacije UNP-a [14]

Klasa UNP-a	Temperatura, °C	Udio propana/butana u mješavini, %
Klasa A	-10	od 100/0 do 60/40
Klasa B	-5	od 60/40 do 40/60
Klasa C	0	od 40/60 do 30/70
Klasa D	10	od 30/70 do 10/90
Klasa E	20	od 10/90 do 0/100

Tablica 4. Prikaz sastava UNP-a u Europi [5]

Država	Klasa UNP-a	Udio propana/butana u mješavini, %
Austrija	A	od 100/0 do 80/20
Belgija	A	60/40 cijelu godinu
Češka	A-C	60/40 zimi 40/60 ljeti
Danska	A	70/30 od 01.09. do 31.05.
Finska	A	95/5 od 01.09. do 31.05.
Francuska	A-C	Klasa A od 01.11. do 31.03. Klasa C ljeti
Njemačka	A-E	Klasa B od 01.12. do 31.03. Klasa E ljeti
Grčka	D	20/80 cijelu godinu
Mađarska	C	40/60 cijelu godinu
Irska	A	100/0 cijelu godinu
Italija	A-C D-E	od 90/10 do 20/80 od 01.11. do 31.03. Klasa D ili E ljeti
Poljska	A-D	Klasa A od 01.11. do 31.03. Klasa D ljeti
Portugal	A	92/8
Slovenija	C	35/65
Španjolska	C	35/65 od 01.11. do 31.03.
Turska	B	50/50 od 01.11. do 31.03. 30/70 ljeti
Ujedinjeno Kraljevstvo	A	100/0 cijelu godinu

Spremnik UNP-a u vozilu puni se do 80-85 % sadržaja [9],[12], što znači da je 80-ak % volumena ukapljeni naftni plin, dok ostatak čine pare naftnog plina. Tlak tih para u spremniku ovisi o temperaturi, te se u dijagramu na slici 1 može vidjeti ta ovisnost. Ukoliko bi se temperatura povećala došlo bi do isparavanja UNP-a u spremniku i njegovog širenja, a time bi se povećao tlak para u spremniku. Ukoliko bi taj tlak narastao preko tlaka namještenog na sigurnosnom ventilu, došlo bi do ispuštanja plina u atmosferu. Zbog toga se spremnik puni samo na spomenutih 80-ak % ukupnog volumena kako bi ostalo dovoljno prostora za širenje plina pri isparavanju.



Slika 1. Dijagram ovisnosti tlaka para UNP-a o temperaturi za razne udjele propana i butana u mješavini UNP-a [13]

1.3.1.1. Svojstva UNP-a

UNP ima visoki oktanski broj (OB), a mali cetanski broj (CB).

Oktanski broj označava otpornost goriva prema naglom, detonantnom izgaranju koje je posljedica nekontroliranog samozapaljenja goriva. Cetanski broj pak označava sposobnost samozapaljenja goriva.

Za Ottove motore poželjno je da gorivo ima što veći oktanski broj, dok je za Dieslove motore poželjno da gorivo ima što veći cetanski broj. Prema tome, jasno je da je ukapljeni naftni plin pogodniji za rad u Ottovom motoru, nego što je to slučaj za Dieslov motor. Upravo zbog toga UNP dominira na tržištu upravo u Ottovim motorima, dok se za Dieslove motore vrlo rijetko koristi.

Tablica 5. Svojstva propana i butana prema normi EN 589 [14]

Svojstva propana i butana		
Kemijska formula	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
Molarna masa	44,09	58,12
Specifična težina u plina odnosu na zrak (zrak = 1)	1,5	2
Specifična težina tekućine u odnosu na vodu (voda = 1)	0,51	0,575
Točka ključanja (°C)	-42	-0,5
Točka smrzavanja (°C)	-186	-150
Donja ogrijevna moć kapljevine kcal/kg	11 000	10 900
Donja ogrijevna moć kapljevine kJ/kg	46 000	45 600
Gornja ogrijevna moć kapljevine kcal/kg	11 900	11 800
Gornja ogrijevna moć kapljevine kJ/kg	49 800	49 400
Donja ogrijevna moć plina kcal/kg	22 600	29 000
Donja ogrijevna moć plina kJ/kg	94 600	121 300
Gornja ogrijevna moć plina kcal/kg	24 000	30 700
Gornja ogrijevna moć plina kJ/kg	100 400	128 500
Temperatura zapaljenja (°C)	450-500	420-490
Temperatura plamena (°C)	1 970	1 975
Kritični tlak (bar)	45,5	37,8

U tablici 5 se mogu vidjeti svojstva dvije glavne komponente UNP-a; propana i butana, dok se u tablici 6 mogu vidjeti prosječna svojstva mješavine ovih komponenti.

Tablica 6. Svojstva UNP-a

UNP/LPG (7,6-10,3 bar) – 40/60 % (propan/butan)	
OB ¹²	92 ÷ 110
CB ¹⁵	-2
Gustoća energije, MJ/L ¹⁰	27,61
Gornja ogrijevna vrijednost, MJ/kg ¹⁰	49,57
Temperatura ključanja, °C ¹²	-0,5 (butan) ÷ -42 (propan)
Temperatura zapaljenja, °C ³	450 ÷ 510
Molarna masa, mol ¹²	~50
Specifična masa, kg/L ¹²	~0,54

1.3.2 Prirodni plin i bioplin (SPP/CNG, UPP/LNG)

Kada govorimo o prirodnom plinu, njegova primjena je vrlo raširena diljem svijeta, te ga u današnje vrijeme slobodno možemo nazvati najrasprostranjenijim izvorom toplinske energije u domaćinstvima. Prirodni plin se, kao i UNP koristi najvećim djelom za kuhanje i grijanje, no polako, ali sigurno oba plina napreduju u autoindustriji, te se svake godine broj vozila pogonjenih nekom vrstom plina povećava.

Prirodni plin se dobija crpljenjem iz zemlje, zbog čega se još zove i zemnim plinom. Međutim, prirodni plin se pri crpljenju iz zemlje sastoji od nekoliko plinova. U najvećoj mjeri je to metan (CH_4), dok ostale primjese uključuju etane, propane, butane, pentane, sulfide, ugljični dioksid, vodenu paru, a ponekad i helij i dušik. Iz zemnog plina se, između ostalih, dobija kao nusprodukt i naftni plin koji se sastoji uglavnom od propana i butana.

S druge strane postoji i **bioplin** koji je također smjesa raznih plinova, a od kojih dominira metan. Bioplin se proizvodi anaerobnim raspadanjem biomase, odnosno bilo kakve vrste organskog materijala. Na taj način dobija se plin kojem su glavne komponente metan (CH_4), ugljični dioksid (CO_2) i u manjoj mjeri sumporovodik (H_2S), te još neki drugi spojevi u tragovima.

Dakle, ovisno o izvoru, pričamo o **zemnom plinu** ili **bioplinu**. Da bi ovi plinovi bili upotrebljivi u autoindustriji, bez obzira govorimo li o zemnom plinu ili o bioplinu, potrebno je iz njih dobiti što čišći metan, i to minimalno 85 %-tni [17]. Tada se bioplin može nazivati i **biometanom**. No, u terminologiji autoindustrije, ovi plinovi se često nazivaju jednostavno **prirodni plin**, kao što se i vozila pogonjena ovim plinovima nazivaju vozilima na prirodni plin (engl. *Natural Gas Vehicle* – NGV).

Za krajnjeg korisnika, nebitno je radi li se o bioplinu ili zemnom plinu u pogledu energetske vrijednosti plina, pošto se oba plina prerađuju kako bi imali što veći udio metana, te zbog toga imaju vrlo slična svojstva.

Takav plin, bogat metanom, se tada može komprimirati ili ukapljiti, pa govorimo o stlačenom (SPP/CNG) ili ukapljenom (UPP/LNG) prirodnom plinu.

Kada pričamo o ukapljenom prirodnom plinu, postotak metana može biti i znatno veći od spomenutih 85 %, te može iznositi čak i preko 99 % [18]. Razlog tome je jer se prilikom postupka ukapljivanja odstranjuju skoro svi ostali plinovi i vodena para.

Tablica 7. Kemijski sastav prirodnog plina u Hrvatskoj, mol % [17]

Kemijski sastav prirodnog plina pri 1,013 bar i 15 °C, mol %		
Metan (CH ₄)	min	85
Etan (C ₂ H ₆)	max	7
Propan (C ₃ H ₈) i viši ugljikovodici	max	6
Dušik (N ₂)	max	3
Ugljični dioksid (CO ₂)	max	2,5
Kisik (O ₂)	max	0,001

1.3.2.1. Stlačeni prirodni plin (SPP/CNG)

Kao što i sama riječ kaže, radi se o prirodnom plinu, odnosno metanu koji je stlačen na tlak između 200 i 250 bara. Time se znatno reducira volumen potreban za smještaj plina, te se omogućuje mobilna primjena, odnosno primjena za pogon motornih vozila. Unatoč tome, mana mu je što zahtjeva na vozilu spremnik većeg volumena nego što je to slučaj kod vozila pogonjenih UNP-om ili UPP-om. Razlog tome je manja gustoća energije po litri goriva.

1.3.2.2. Svojstva SPP-a

SPP ima još i veći oktanski broj od UNP-a, što se može vidjeti u tablici 8, pa je također dominantnu primjenu našao u Ottovim motorima, no koristi se i u Dieslovim *dual-fuel* motorima.

Tablica 8. Svojstva SPP-a

SPP/CNG pri 250 bara	
OB ¹²	120
CB ¹⁵	0
Gustoća energije, MJ/L ⁷	~9
Gornja ogrijevna vrijednost, MJ/kg ⁷	~53,6
Temperatura ključanja, °C ⁷	-161,49
Temperatura zapaljenja, °C ⁷	537
Molarna masa, mol ¹⁹	16,8036
Specifična masa, kg/L ¹⁹	0,206

1.3.2.3. Ukapljeni prirodni plin (UPP/LNG)

Radi se o metanu ohlađenom na temperaturu ispod njegove točke vrelišta: -161,49 °C. Hlađenjem ispod te temperature dolazi do ukapljivanja metana, odnosno metan prelazi iz plinovitog u tekuće stanje. Time se volumen potreban za smještaj plina smanjuje preko 600 puta. Ovaj proces je skup i zahtjevan, pa je pogodnija metoda korištenja pri pogonu vozila ipak komprimiranje metana, no unatoč tome, našao je primjenu u autoindustriji i to u teretnim vozilima. Naime, danas više nije rijetko da se tvrtke odlučuju na ulaganje u vozila pogonjena UPP-om, pogotovo ako imaju veliki vozni park teretnih vozila. U takvim slučajevima ušteda je itekako osjetna. Velik broj vozila koja godišnje prelaze veliki put brzo isplaćuju početnu

investiciju. Primjer je američka tvrtka, najveći dostavljač paketa na svijetu – UPS (engl. *United Parcel Service*), koja u svojoj floti teretnih vozila koristi nekoliko alternativnih izvora energije, a od 2000. godine koriste i UPP, te konstantno ulažu na desetke milijuna dolara, ne samo u flotu vozila, već i u infrastrukturu [20]. To je samo dokaz isplativosti ove tehnologije. Prednost nad komprimiranim metanom je veća gustoća energije po litri goriva, što omogućava veći kapacitet goriva na samom vozilu, a time i veći domet, odnosno manji broj stajanja radi ponovnog punjenja spremnika.

UPP ima vrlo važnu ulogu i u transportu prirodnog plina, jer je ukapljivanjem moguće transportirati plin na velike udaljenosti gdje nije moguće ili nije ekonomično napraviti cjevovod, ili gdje ne postoje lokalni izvori prirodnog plina. Za transport UPP-a postoje posebni brodovi (LNG tankeri), te kamioni (LNG cisterne). Kada je transport izvršen, UPP se može koristiti u tekućem stanju ili se može opet vratiti u plinovito stanje u kojem plin ipak ima daleko veću primjenu.

Mana ovog plina je što ga je potrebno držati na vrlo niskoj temperaturi u spremniku kako bi ostao u ukapljenom stanju. Zato su spremnici ovog plina skuplji od spremnika ostalih spomenutih goriva. Naime, spremnik mora biti dobro izoliran, odnosno sastoji se od nekoliko slojeva, koji usporavaju prijelaz topline iz okoliša u spremnik. No, kako prijelaz topline nije moguće zaustaviti, porastom temperature u spremniku dolazi do isparavanja UPP-a. Pare UPP-a se šire u spremniku i zbog toga raste tlak. Ukoliko se plin ne bi hladio, u roku od 5 dana bi plin počeo isparavati iz spremnika kroz sigurnosni ventil uslijed povećanog tlaka.

1.3.2.4. Svojstva UPP-a

UPP je glavnu primjenu pronašao u teretnim vozilima sa Dieslovim motorima zbog veće gustoće energije goriva po litri.

Tablica 9. Svojstva UPP-a

UPP/LNG pri 3 bara i -160 °C	
OB ¹²	120
CB ¹⁵	0
Gustoća energije, MJ/L ⁷	~22,2
Gornja ogrijevna vrijednost, MJ/kg ⁷	~53,6
Temperatura ključanja, °C ⁷	-161,49
Temperatura zapaljenja, °C ⁷	537
Molarna masa, mol ¹⁹	16,8036
Specifična masa, kg/L ¹⁹	0,42262

1.4. Izgaranje plinova za pogon motornih vozila i emisije njihovih ispušnih plinova

Općenito i naftni i prirodni plin izgaraju čišće od konvencionalnih goriva, te se njihovim uvođenjem u postojeći vozni park pridonosi smanjenju emisija štetnih tvari iz ispušnih plinova u cestovnom prometu. U tablici 10 su prikazane približne ogrijevne vrijednosti i gustoće energije nekih goriva pri izgaranju.

Tablica 10. Približne energetske vrijednosti nekih goriva pri izgaranju

Gorivo	Gornja ogrijevna vrijednost, MJ/kg	Gustoća energije, MJ/L
Bezolovni benzin ¹⁶	46,4	34,2
Dizelsko gorivo ¹⁶	45,6	38,6
LPG (propan) ¹⁶	49,6	25,3
LPG (butan) ¹⁶	49,1	27,7
LPG (mješavina, 40/60 % - propan/butan) ¹⁰	49,57	27,61
Metan (pri 1,013 bar i 15 °C) ⁷	55,6	0,0378
Prirodni plin ili biometan ⁷	53,6	0,0364
CNG (pri 250 bar) ⁷	53,6	9
LNG (pri 3 bara i -160°C) ⁷	53,6	22,2
Vodik (pri 700 bara i 15°C) ⁷	142	5,6

Da bi izgaranje goriva bilo što potpunije i čišće, potrebno je da to gorivo ima što manje neželjenih komponenti i da su ugljikovodici od kojih se sastoji što jednostavnije strukture. Od svih navedenih goriva, prirodni, odnosno bioplin je najjednostavniji ugljikovodik. Razlog tome je jer se najvećim dijelom sastoje od metana (CH₄), a kako njegov postotak u gorivu iznosi u nekim slučajevima i preko 99 %, može se zaključiti da će to gorivo izgarati potpunije i čišće od ostalih. Kako bi provjerili ovu tvrdnju potrebno je napisati kemijske reakcije koje nastaju izgaranjem spomenutih goriva.

Dizelsko gorivo je mješavina ugljikovodika alkana i arena. Mješavina je to lanaca ugljika koji tipično sadrže između 8 i 21 atom ugljika po molekuli [7].

Benzin je također mješavina ugljikovodika i to alkana, cikloalkana i alkena, a tipično sadrže između 4 i 12 atoma ugljika po molekuli [7].

Oba goriva sadrže niz aditiva radi boljih svojstava, te i neke nečistoće. Zbog toga se njihove kemijske formule moraju pojednostavniti, a tipične empirijske kemijske formule kojima se mogu izraziti dizelsko i benzinsko gorivo glase:

- Dizelsko gorivo: $C_{12}H_{23}$
- Benzin: C_8H_{18}

Primjer sastava benzina u volumnim udjelima [21]:

21 % cikloheksan,	C_6H_{12}
17 % izo-oktan,	C_8H_{18}
16 % izo-pentan,	C_5H_{12}
16 % etilebenzen,	C_8H_{10}
15 % toluen,	C_7H_8
12 % n-dekan,	$C_{10}H_{22}$
3 % naftalen,	$C_{10}H_8$
sve ostale komponente < 1 %.	

Poznato je da pri potpunom izgaranju ugljikovodika nastaju CO_2 i vodena para, pa prema tome slijede kemijske reakcije:

- **Dizelsko gorivo** $4 C_{12}H_{23} + 71 O_2 = 48 CO_2 + 46 H_2O$
- **Benzin**
 $2 C_8H_{18} + 25 O_2 = 16 CO_2 + 18 H_2O$
 $C_6H_{12} + 9 O_2 = 6 CO_2 + 6 H_2O$
- **Butan** $2 C_4H_{10} + 13 O_2 = 8 CO_2 + 10 H_2O$
- **Propan** $C_3H_8 + 5 O_2 = 3 CO_2 + 4 H_2O$
- **Metan** $CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2 H_2O$

Vidljivo je da što je ugljikovodik jednostavnije strukture, to je potrebno manje kisika za izgaranje, a time nastaje i manje ugljičnog dioksida. Korektno bi bilo reći; što je manji omjer ugljika i vodika u strukturi ugljikovodika, to će nastati manje CO_2 pri izgaranju.

Nažalost, izgaranje u stvarnosti nije nikada potpuno, te zbog toga nastaje i ugljični monoksid (CO), te čađa, odnosno krute čestice (PM), a zbog prisutnosti dušika u zraku nastaju dušikovi spojevi (NO_x). U dizelskom gorivu je zbog sumpora moguća i pojava sumporovih oksida (SO_2), no to je danas svedeno na minimum jer je u Europi na snazi standard za kvalitetu goriva prema kojem udio sumpora u dizelskom gorivu ne smije biti veći od 10 ppm (engl. *parts per million*) [7].

Potpun prikaz svih štetnih tvari nastalih izgaranjem ovih goriva nalazi se u poglavlju 3.

Poznavajući molarne mase ovih elemenata, može se izračunati koliko je potrebno kilograma kisika za potpuno izgaranje 1 kilograma goriva, te koliko će produkata nastati.

C = 12,011 g/mol

H = 1,008 g/mol

O = 15,999 g/mol

Prema tome slijedi:

- **Dizelsko gorivo** $1 \text{ kg C}_{12}\text{H}_{23} + 3,395 \text{ kg O}_2 = 3,157 \text{ kg CO}_2 + 1,238 \text{ kg H}_2\text{O}$
- **Benzin** $1 \text{ kg C}_8\text{H}_{18} + 3,501 \text{ kg O}_2 = 3,082 \text{ kg CO}_2 + 1,419 \text{ kg H}_2\text{O}$
 $1 \text{ kg C}_6\text{H}_{12} + 3,422 \text{ kg O}_2 = 3,138 \text{ kg CO}_2 + 1,284 \text{ kg H}_2\text{O}$
- **Butan** $1 \text{ kg C}_4\text{H}_{10} + 3,579 \text{ kg O}_2 = 3,029 \text{ kg CO}_2 + 1,550 \text{ kg H}_2\text{O}$
- **Propan** $1 \text{ kg C}_3\text{H}_8 + 3,628 \text{ kg O}_2 = 2,994 \text{ kg CO}_2 + 1,634 \text{ kg H}_2\text{O}$
- **Metan** $1 \text{ kg CH}_4 + 3,989 \text{ kg O}_2 = 2,743 \text{ kg CO}_2 + 1,246 \text{ kg H}_2\text{O}$

Iako i prirodni i naftni plin imaju veću ogrijevnu vrijednost od benzina i dizelskog goriva, kao što se može vidjeti u tablici 10, to ne znači da će se izgaranjem jednake količine goriva dobiti jednaka količina energije. Razlog tome je gustoća energije goriva koja nije jednaka za sva navedena goriva, pa ako se iskoriste vrijednosti iz tablice 10, slijedi tablica u kojoj se mogu usporediti energetske sadržaji po litri goriva.

Tablica 11. Usporedba odnosa energetskih sadržaja raznih goriva

Litra/Litra	Benzin	Dizel	Butan	Propan	SPP	UPP
Benzin	1	1,129	0,810	0,740	0,263	0,649
Dizel	0,886	1	0,718	0,655	0,233	0,575
Butan	1,235	1,394	1	0,913	0,325	0,801
Propan	1,352	1,526	1,095	1	0,356	0,877
SPP	3,800	4,289	3,078	2,811	1	2,467
UPP	1,541	1,739	1,248	1,140	0,405	1

Tablica 11 prikazuje odnos goriva po energetskom sadržaju, npr. energetski sadržaj 1 litre benzina odgovara energetskom sadržaju 0,886 litara dizelskog goriva ili energetski sadržaj 1 litre dizelskog goriva odgovara energetskom sadržaju 1,129 litara benzina.

Dakle, iako benzin i dizelsko gorivo imaju nižu ogrijevnu vrijednost od plinovitih goriva, vidi se da je općenito potrebno potrošiti veće sadržaje ovih plinovitih goriva za dobivanje jednakog sadržaja energije u odnosu na benzin i dizelsko gorivo. SPP ima najmanju gustoću energije po litri goriva, pa je prema tome i potrošnja najveća. No, usprkos tome, cijena 1 litre benzina na današnjem tržištu je skuplja od cijene tih 3,8 litara SPP-a. Cijena 1 kilograma

SPP-a, što otprilike odgovara 6 litara SPP-a, iznosi na današnjem tržištu 8,50 kuna, dok je cijena 1 litre benzina 9,42 kune (Eurosuper 98). Isto vrijedi i za UNP, koji košta 3,80 kune po litri. Prema tome, iako je potrošnja plinovitih goriva veća, utrošak novaca je manji. Najbolje je to prikazati tablicom gdje se može vidjeti koliko treba utrošiti nekog goriva radi dobivanja iste količine energije.

Tablica 12. Usporedba goriva prema potrošnji i cijeni

Gorivo	Dobivena energija, MJ	Potrošnja, L	Cijena, kn	Količina nastalog CO ₂ , kg	Smanjenje emisija CO ₂ u odnosu na benzin, %
Benzin	100	2,92	27,54	6,80	0
Dizelsko gorivo	100	2,59	21,50	6,79	0,20
UNP (60/40 butan/propan)	100	3,75	14,24	6,12	10,10
SPP	100	11,11	15,86	5,12	24,76
UPP	100	4,50	Nepoznata	5,12	24,76

U tablici 12 su prikazani sadržaji raznih goriva u litrama, potrebni za dobivanje 100 MJ energije izgaranjem istih, a također se može vidjeti koliko će nas to koštati prema današnjim cijenama goriva u Hrvatskoj. Prikazana je i količina nastalih produkata izgaranja CO₂, a u odnosu na benzin su prikazana i smanjenja emisija CO₂ pri izgaranju drugih goriva. Vidi se da bi vozilo pogonjeno UNP-om u teoriji trebalo emitirati oko 10 % manje emisije CO₂ u odnosu na vozila pogonjena benzinom i dizelskim gorivom, a vozila pogonjena prirodnim plinom oko 25 % manje.

2. Motori pogonjeni plinom

Postoje 3 tipa vozila pogonjenih na plin, bilo to vozilo na UNP, SPP ili UPP:

- **Vozilo na čisti plin** – vozilo namijenjeno za pogon isključivo plinom (paljenje smjese iskrom) – vrlo rijetko se koristi u cestovnom prometu, te se neće razmatrati (koristi se kod viličara, autobusa i sl.)
- **Bi-fuel** ili **bivalentno vozilo** – vozilo koje ima dva odvojena sustava opskrbe gorivom koji omogućuju pogon vozila na plin ili na benzin (u oba slučaja paljenje smjese goriva i zraka iskrom)
- **Dual-fuel vozilo** – vozilo koje za pogon koristi plin u kombinaciji sa određenom količinom dizelskog goriva potrebnim za paljenje smjese, a u slučaju nestašice plina vozilo se prebacuje na dizelsko gorivo (u oba slučaja kompresijsko paljenje smjese goriva i zraka)

Nažalost u Hrvatskoj je infrastruktura potrebna za vozila pogonjena prirodnim plinom praktički nepostojeća, sa samo 2 punionice u RH, te je stoga i broj ovakvih vozila vrlo malen. U 2015. godini je, prema izvješću Centra za vozila Hrvatska, registrirano tek 54 vozila pogonjenih SPP-om (uglavnom autobusi), poražavajućih 0 vozila pogonjenih UPP-om, dok je za vozila pogonjena UNP-om ta brojka iznosila preko 55.000 vozila [22].

2.1. Vozila na ukapljeni naftni plin

Kako je već prije spomenuto, UNP se koristi uglavnom u Ottovim motorima, ponajprije u kategoriji vozila M1, odnosno osobnim automobilima. Slično kao i kod prirodnog plina, Ottov motor može biti prenamijenjen za pogon UNP-om ili pogon pomoću oba goriva, dakle ili benzinom ili UNP-om, što je i puno češći slučaj. U oba slučaja iskra pali smjesu zraka i goriva.

Kod teretnih vozila, odnosno vozila s Diesellovim motorom, može se UNP koristiti zajedno s dizelskim gorivom. Tu se paljenje komprimirane smjese plina i zraka odvija pomoću ubrizgavanja male količine dizelskog goriva. Naime, samo komprimiranje smjese zraka i UNP-a ne stvara dovoljno veliku temperaturu u cilindru da bi došlo do samozapaljenja smjese kao što je to slučaj sa dizelskim gorivom. Temperatura samozapaljenja UNP-a kreće se oko 500 °C, ovisno o sastavu, dok za dizelsko gorivo ta temperatura iznosi oko 250 °C. Prema tome, potrebno je u smjesu plina i zraka ubrizgati malu količinu dizelskog goriva koje se trenutno pali zbog više temperature uslijed kompresije u cilindru, te na taj način pali ostatak smjese.

Na hrvatskom tržištu su najviše zastupljeni bivalentni Ottovi motori, odnosno motori pogonjeni UNP-om i/ili benzinom. Vozila koja su pogonjena isključivo plinom se danas vrlo rijetko mogu naći jer su ih prednosti bivalentnih motora istisnule s tržišta. Najveća prednost

je ta što se u slučaju nestanka plina, motor automatski prebacuje na „originalno“ gorivo, odnosno benzin, te se na taj način povećava i put koje vozilo može prijeći jednim punjenjem spremnika. *Dual-fuel* Diesellovi motori pogonjeni UNP-om također su rijetkost na našem tržištu.

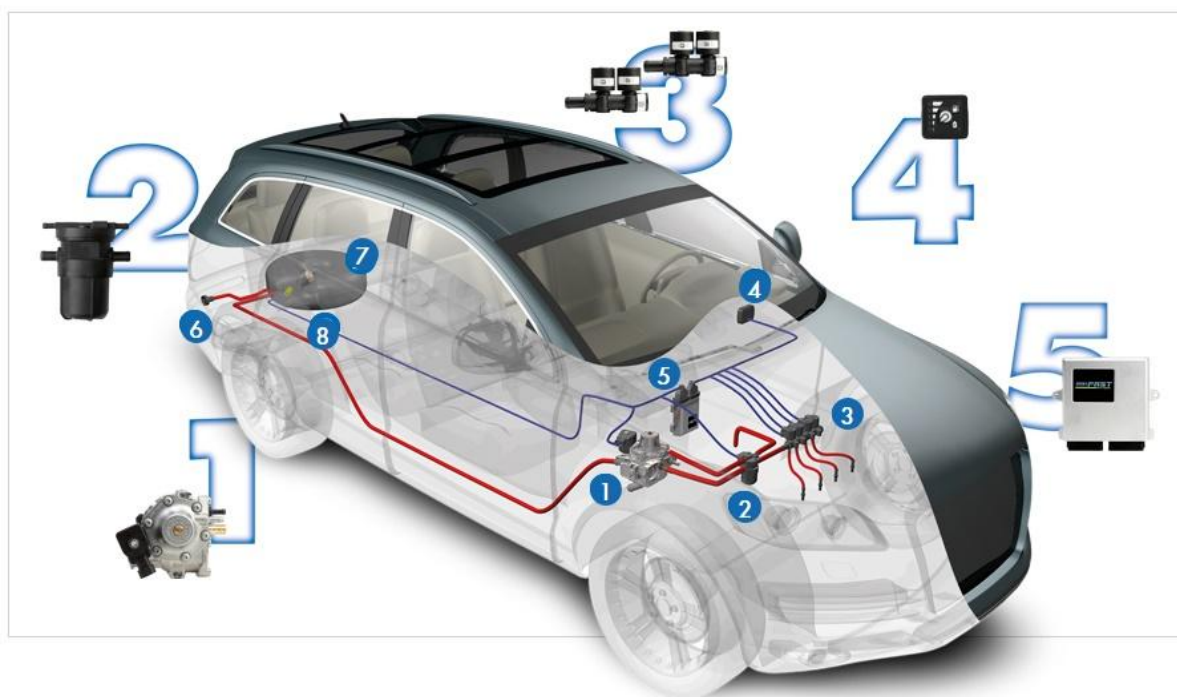
2.2. Vozila na prirodni plin (NGV)

Kao i kod UNP-a, osobna vozila sa Ottovim motorom su tipično pogonjena čistim plinom ili su *bi-fuel* vozila, dok su teretna vozila, odnosno vozila s Diesellovim motorom tipično pogonjena čistim plinom ili *dual-fuel* vozila. U najvećem broju slučajeva radi se o *bi-fuel* ili *dual-fuel* vozilima upravo zbog mogućnosti vožnje na „originalno“ gorivo ukoliko usred vožnje vozilo ostane bez plinskog goriva. Prema tome razmatrati će se samo takva vozila.

Opskrba stlačenim prirodnim plinom (SPP) se koristi i u osobnim i teretnim vozilima, dok je skuplja verzija sustava opskrbe ukapljenim prirodnim plinom (UPP) ekonomski isplativa samo na teretnim vozilima. Kako je već prije spomenuto, razlog tome je veća gustoća energije po litri goriva UPP-a u odnosu na SPP, što je kod teretnih vozila bitno jer mogu prijeći veći put sa spremnikom istog volumena.

2.3. Opis potrebnih uređaja u vozilu pogonjenom plinom

2.3.1 Bivalentni ili *bi-fuel* Ottov motor pogonjen UNP-om ili SPP-om



- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1 – isparivač plina, | 2 – filter plina, | 3 – sustav za ubrizgavanje plina, |
| 4 – prekidač plin/benzin, | 5 – upravljačko računalo, | 6 – priključak za punjenje plina, |
| 7 – spremnik plina, | 8 – armatura spremnika plina | |

Slika 2. Prikaz potrebnih uređaja u osobnom vozilu sa *bi-fuel* motorom pogonjenim UNP-om i benzinom [23]

Glavne komponente dodatnog sustava za opskrbu bivalentnog vozila UNP-om su prikazane na slici 2, a one su:

Isparivač ili konverter plina je uređaj koji ima 3 funkcije:

- reducira tlak plina koji dolazi iz spremnika na atmosferski tlak
- regulira protok plina ovisno o potrebnom opterećenju motora
- isparava plin preko izmjenjivača topline koristeći rashladnu tekućinu motora

Filter plina služi za pročišćavanje plina od mogućih nečistoća, te je opremljen osjetnicima temperature i tlaka plina, te osjetnikom tlaka u usisnoj grani.

Sustav ubrizgavanja goriva sekvencijalno ubrizgava potrebnu količinu plina direktno u svaki cilindar ili u usisnu granu (multipoint ubrizgavanje). Sekvencijalno ubrizgavanje znači da je ubrizgavanje vremenski podešeno da se odvija u toku usisa svakog cilindra zasebno. Plin se ubrizgava u plinovitom stanju pomoću brizgaljki ili mješača, no postoje sustavi ubrizgavanja plina i u tekućoj fazi. Radi se o tehnologiji koja se tek počinje koristiti. U tom slučaju ne postoji potreba za isparivačem plina jer plin ubrizgavanjem u usisnu granu isparava, te tako hladi zrak s kojim se miješa i povećava gustoću usisa, a time i dobivenu snagu. U usporedbi sa brizgaljkama plinovite faze imaju manju potrošnju goriva i smanjenu emisiju štetnih tvari, a još bolji učinak ima ubrizgavanje tekuće faze direktno u cilindar [24]. Ovakvi sustavi ubrizgavanja omogućuju bolju kontrolu doziranja.

Prekidač plin/benzin služi vozaču za prebacivanje rada motora s jednog goriva na drugo, te obično sadrži i pokazivač razine plina u spremniku. Prekidačem se također kontrolira elektromagnetski *shut-off* ventil koji automatski zatvara dovod plina iz spremnika kada vozač želi voziti na benzin. Kontrola tog ventila se može odvijati i preko ključa za start vozila. Kada ključem vozač daje kontakt za pokretanje motora, odnosno zatvori strujni krug, ventil se otvara, odnosno zatvara kada se strujni krug prekine. Ova funkcija obično se koristi kod vozila pogonjenim čistim plinom ili *dual-fuel* vozila, dok se bivalentna vozila obično pokreću benzinom, pa nije potrebna trenutna opskrba plinom pri pokretanju vozila, jer se tek nakon pokretanja motora vozilo prebacuje na pogon plinom.

Upravljačko računalo služi za pravilan rad cijelog sustava, a rad bazira na informacijama, odnosno dobivenim signalima iz raznih osjetnika u vozilu. Neki od bitnih uređaja su pokazivač razine goriva, *shut-off* ventil goriva, lambda sonda, uređaj za kontrolu ubrizgavanja plina i dr.

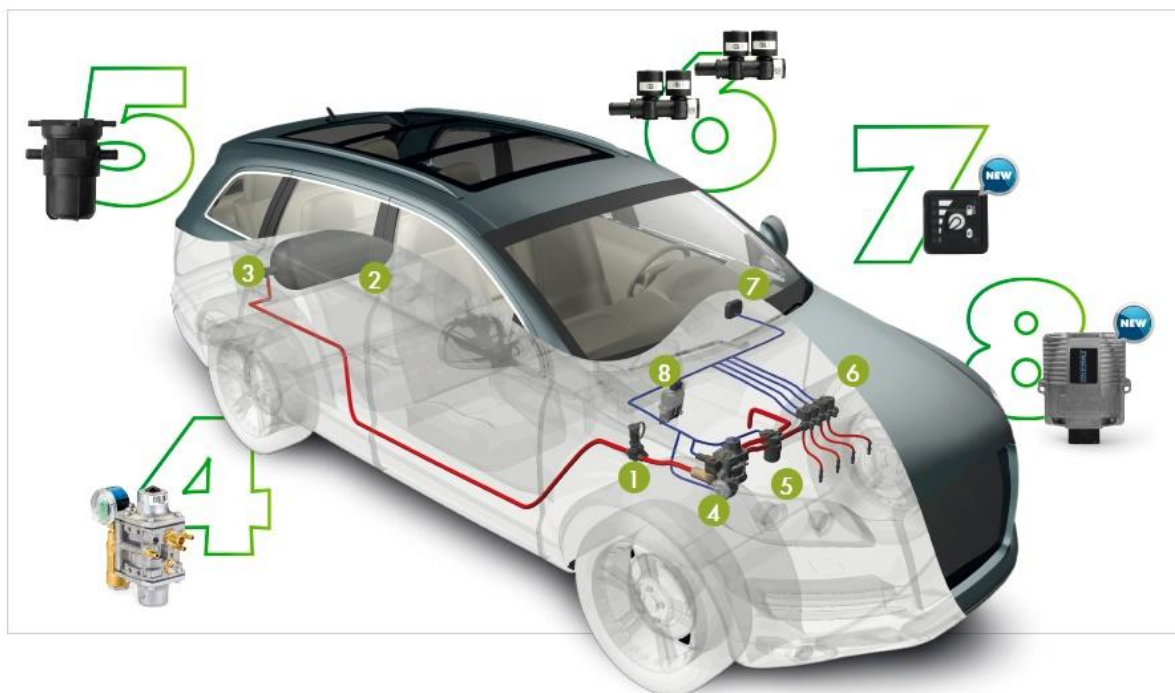
Priključak za punjenje plina obično se nalazi na zadnjem braniku ili pokraj već postojećeg priključka za punjenje goriva. Postoji nekoliko tipova ovih priključaka, a u Hrvatskoj se koristi *Dish adapter*.

Spremnik plina najčešće je toroidalnog oblika, kako bi se mogao ugraditi na mjesto rezervnog kotača, ali također mogu spremnici biti cilindrični, te se smjestiti u prtljažni prostor ili ispod vozila ukoliko je to moguće. Radi se vrlo čvrstim spremnicima koji su

višestruko sigurniji od spremnika za benzin ili dizelsko gorivo, no zbog toga su i teži. Obično su čelični, a u novije vrijeme proizvode se i od ljevanog aluminija radi manje mase. U spremniku se UNP pohranjuje u tekućem stanju, no zbog isparavanja se puni do 80 % volumena, te ostalih 20 % volumena čine pare UNP-a. Tlak para ovisi o temperaturi kako je prikazano u poglavlju 2 na dijagramu sa slike 1.

Armatura spremnika je skup ventila koji omogućuju ulaz i izlaz plina iz spremnika. Također sadrži manometar koji mjeri tlak u spremniku, te jedan ili više sigurnosnih ventila.

Naravno potrebni su i električni i plinski vodovi, te niz elektromagnetskih ventila, a u starijim generacijama vozila se umjesto današnjih sustava ubrizgavanja koristio tzv. mješač plina i zraka, nešto poput rasplinjača kod starih Ottovih motora. Oba uređaja su zastarijela, te se zbog smanjenja emisija štetnih tvari danas teži korištenju sustava ubrizgavanja pomoću brizgaljki goriva u tekućoj ili plinovitoj fazi. Doduše, danas je još uvijek široko rasprostranjena upotreba upravo mješača plina i zraka.

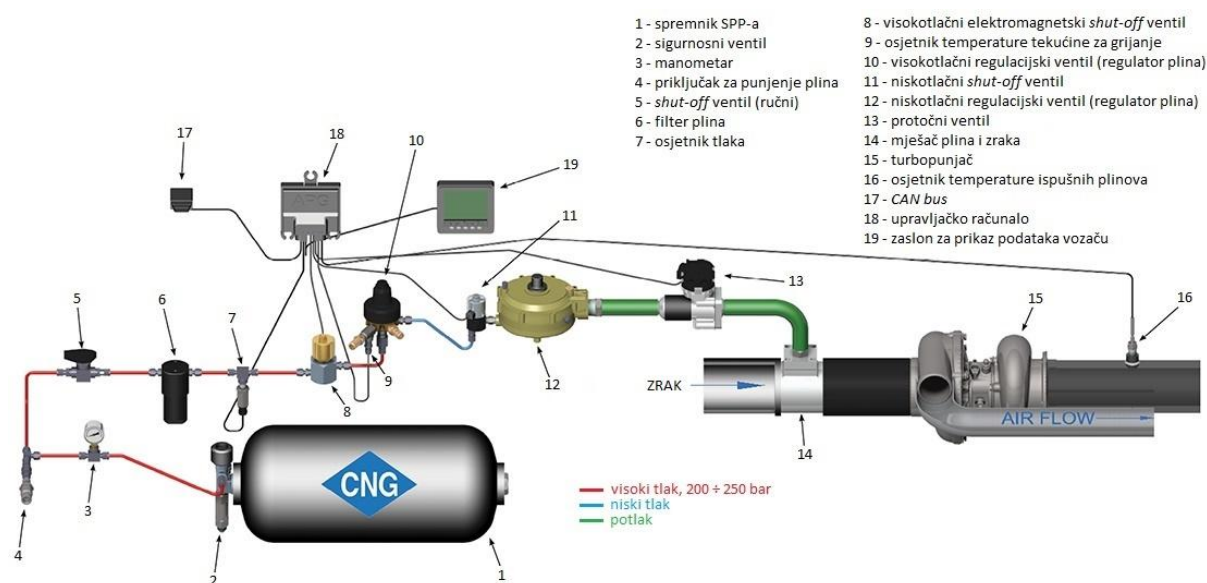


- | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 1 – priključak za punjenje plina, | 2 – spremnik plina, | 3 – armatura spremnika plina, |
| 4 – isparivač plina, | 5 – filter plina, | 6 –sustav za ubrizgavanje plina, |
| 7 – prekidač plin/benzin, | 8 – upravljačko računalo | |

Slika 3. Prikaz potrebnih uređaja u osobnom vozilu sa bi-fuel motorom pogonjenim SPP-om i benzinom [23]

Bivalentni motori pogonjeni UNP-om i SPP-om su vrlo slični, te postoji tek nekoliko razlika. Jedna je u konverteru, koji više nema funkciju isparavanja plina jer je SPP već pohranjen u spremniku u plinovitom stanju. U tom slučaju konverter služi samo za reduciranje tlaka i reguliranje protoka plina. Svi ostali uređaji imaju identične funkcije kao pri opskrbi UNP-om. Još jedna razlika je u broju spremnika. Naime, SPP ima gotovo 2,5 puta manju gustoću energije po litri goriva od UPP-a, pa je potreban spremnik većeg volumena za istu količinu energije. Zbog toga vozila pogonjena SPP-om obično imaju dva ili više cilindričnih spremnika.

2.3.2 Dual-fuel Dieslov motor pogonjen SPP-om



Slika 4. Prikaz potrebnih uređaja u vozilu sa dual-fuel motorom pogonjenim SPP-om i dizelskim gorivom [25]

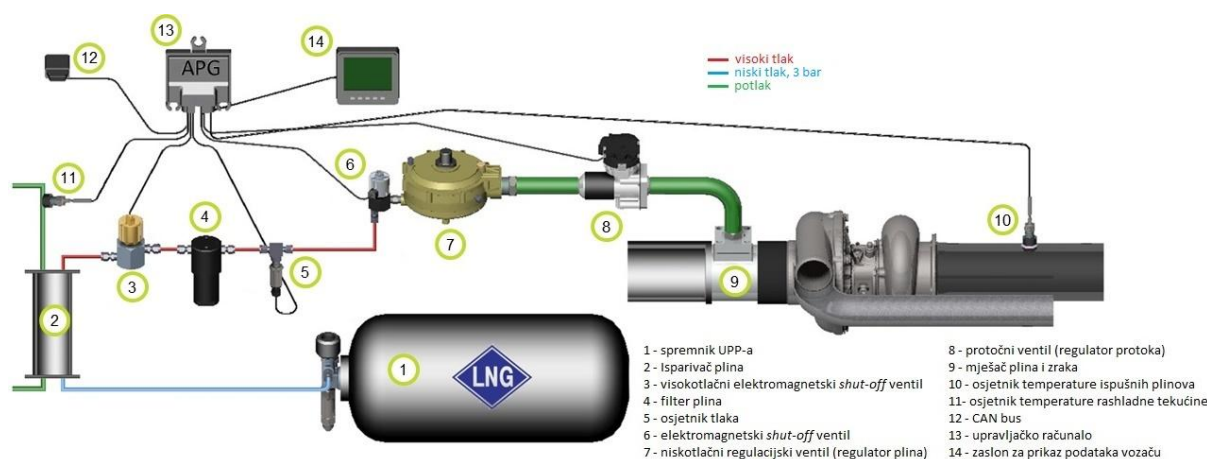
Ovaj sustav opskrbe plinom vrlo je sličan onome kod bivalentnih motora uz nekoliko bitnih razlika. Naime, kao što je već prije objašnjeno, u Dieslovom motoru se smjesa plina i zraka ne pali iskrom već kompresijom, no da bi se SPP upalio, potrebna je temperatura od 540 °C, što nije moguće postići samo kompresijom. Trebalo bi bitno povećati kompresijski omjer da bi to bilo moguće, a to bi zahtjevalo velike preinake na motoru. Zbog toga se u cilindar ubrizgava određena količina dizelskog goriva koje se trenutno pali pri kompresiji zraka i plina i tako pali ostatak smjese.

Na slici se mogu vidjeti uređaji sustava koji opskrbljuje motor plinom preko mješača plina i zraka. Kao što je rečeno prije, danas se najviše koriste sustavi ubrizgavanja u usisnu granu ili direktno u cilindar pomoću brizgaljki plina u plinovitoj fazi. U takvim sustavima, protočni ventil i mješač su zamjenjeni brizgaljkama koje ubrizgavaju plin u usisnu granu ili cilindar, te se miješaju za zrakom. Na taj način odvija se bolje miješanje, a ujedno se omogućuje i gotovo potpuno izgaranje dizelskog goriva, što je nemoguće u uobičajenim Dieslovim motorima, gdje izgara oko 85 % goriva [26].

Dizelsko gorivo i SPP se u ovom motoru ubrizgavaju u omjeru 50/50 %, što direktno smanjuje emisije štetnih tvari u odnosu na uobičajene Dieslove motore, jer SPP izgara čišće i pospješuje izgaranje dizelskog goriva [26]. Ovaj omjer može varirati ovisno o proizvođaču opreme, vozilu na koje se sustav ugrađuje i sl.

SPP pod velikim tlakom izlazi iz spremnika, te se tlak reducira pomoću regulacijskog ventila, za razliku od UPP-a koji izlazi iz spremnika pod malim tlakom, no nakon prolaska kroz isparivač tlak naglo raste, te je zbog toga pogodan za motore velike snage gdje je potrebna veća gustoća usisa.

2.3.3 Dual-fuel Dieslov motor pogonjen UPP-om ili UNP-om



Slika 5. Prikaz potrebnih uređaja u vozilu sa dual-fuel motorom pogonjenim UPP-om i dizelskim gorivom [27]

Kao i kod bivalentnih motora pogonjenih tekućim ili plinovitim gorivom, i kod *dual-fuel* motora pogonjenih tekućim ili plinovitim gorivom, javljaju se slične razlike. Dakle, kod motora pogonjenog SPP-om konverter služi samo za regulaciju tlaka i protoka, dok je kod motora pogonjenim UNP-om ili UPP-om potrebna i funkcija isparivača kako bi ukapljeni plin mogao ispariti. Osim toga sustavi su gotovo identični, što se može i vidjeti usporedbom slika 4 i 5. Kod ovih motora dolazi u obzir i ubrizgavanje plina u tekućoj fazi pomoću brizgaljke u usisnu granu ili u cilindar. Time u sustavu više nisu potrebni isparivač, mješač i protočni ventil, već sav posao odraduju brizgaljke. Plin ubrizgavanjem u usisnu granu ili cilindar trenutno isparava, jer je tu temperatura uvijek veća od temperature isparavanja ovih plinova, a isparavanjem hlade zrak u smjesi, te tako povećavaju gustoću usisa.

Dizelsko gorivo i UNP se ubrizgavaju u omjeru 80/20 % u korist dizelskog goriva [26].

2.4. Preinake na motorima

Vozilo s Ottovim motorom se može prenamjeniti u *bi-fuel* i *dual-fuel* vozilo sa minimalnim preinakama na motoru, te uz dodavanje potrebne opreme za rad sustava. Da bi se pak prenamjenilo u vozilo pogonjeno čistim plinom, bile bi potrebne skupe i komplicirane preinake, te se to obično ne radi.

S druge strane, vozilo s Diesellovim motorom može se naknadno prenamjeniti u bilo koji od navedena tri tipa vozila pogonjenih plinom bez većih preinaka na motoru, te naravno uz potrebnu opremu za rad sustava.

Ipak, najkorištenija su *bi-fuel* i *dual-fuel* vozila, upravo zbog mogućnosti korištenja oba goriva, što povećava i put koje vozilo može prijeći.

2.5. Prednosti i nedostaci

Prednost korištenja plina umjesto benzina ili dizelskog goriva je svakako cijena. Cijene autoplina i prirodnog plina su višestruko manje od cijena benzina i dizelskog goriva. Zbog toga su vozila pogonjena plinom vrlo isplativa i sve popularnija. Činjenica da su ovi plinovi pohranjeni pod tlakom u spremnicima nije problem, jer spremnici su konstruirani sa višestruko većim faktorom sigurnosti u odnosu na spremnike benzina i dizelskog goriva, te moraju biti atestirani i moraju se ispitati svakih 10 godina za UNP, odnosno 6 godina za SPP prema Pravilniku o uređajima, opremi i sustavima za pogon motornih vozila plinom.

Prednosti i nedostaci plinovitih goriva su sljedeće [7], [24], [28], [29], [30], [31]:

Prednosti plinovitih goriva

- Ulaze u cilindar u plinovitom stanju zbog čega je smanjen utjecaj korozije na dijelove motora, a također pospješuje miješanje sa zrakom.
- Ravnomjernije miješanje znači i potpunije izgaranje, te se javlja manje taloga čađe na svijećicama kod Ottovih motora.
- Zbog čisteg izgaranja produljen je i životni vijek motora.
- Ne zagađuju ili razrijeđuju ulje za podmazivanje, čime se produljuje vijek trajanja ulja.
- Nekoliko puta sigurniji sustavi od sustava opskrbe benzinom.
- Jeftinija goriva od konvencionalnih fosilnih goriva.
- Punjenje vozila vremenski je usporedivo s konvencionalnim gorivima.
- Vozila pogonjena SPP-om imaju manje troškove održavanja nego bilo koje drugo vozilo pogonjeno fosilnim gorivom.
- Sustavi opskrbe SPP-om su nepropusni, što sprječava gubitke goriva zbog isparavanja ili curenja.

- Vozila pogonjena SPP-om emitiraju znatno manje količine štetnih tvari, 20 % manje emisije CO₂ u odnosu na Diesellove motore, 29 % < CO₂, 80 % < NMHC, 50 % < NO_x, 67 % < CO u odnosu na Ottove motore.
- SPP i UPP se mogu proizvesti iz bioplina, obnovljivog izvora energije.
- UNP zahtjeva daleko manju kompresiju od SPP-a, što čini troškove pohrane manjima.
- Vrlo raširena primjena UNP-a, prema tome i velik broj punionica, te najjeftinije gorivo.

Nedostaci plinovitih goriva

- Općenito plinovita goriva imaju manju gustoću energije po litri, pa je potreban veći sadržaj goriva radi dobivanja jednakog sadržaja energije.
- Manji broj punionica u odnosu na punionice konvencionalnih goriva.
- Veći troškovi pohrane zbog komprimiranja SPP-a, odnosno hlađenja UPP-a.
- Vozila pogonjena SPP-om trebaju spremnik većeg volumena zbog manje gustoće energije po litri goriva, te zauzimaju veći prostor u vozilu, čak i u odnosu na druga plinovita goriva.
- Spremnik UPP-a mora biti vrlo dobro izoliran radi što manjeg isparavanja uslijed prijelaza topline, što mu diže cijenu.
- Zato što je teži od zraka, UNP pri curenju iz spremnika predstavlja veliku opasnost zbog mogućeg gušenja u nedostatku kisika, te moguće eksplozije zbog sklonosti skupljanja u zatvorenom prostoru i vrlo velike zapaljivosti.

3. Analiza u programskom paketu *Copert*

3.1. Što je to *Copert*?

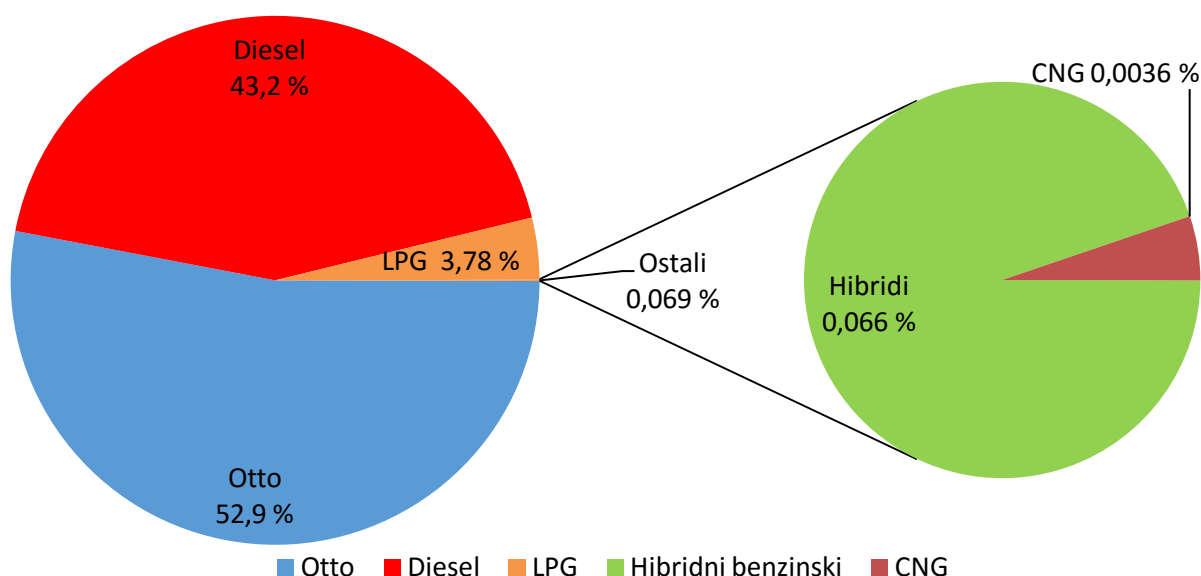
Programski paket *Copert* je rezultat dugogodišnjeg istraživanja vodećih europskih stručnjaka, te vuče korijene iz davne 1989. godine. Svrha ovog programa je izračun emisija štetnih tvari i stakleničkih plinova iz ispušnih plinova vozila u cestovnom prometu. Koristi se diljem svijeta i službeni je programski paket za proračun emisija u Europskoj Uniji. Na ovaj se način može procijeniti količina nastalih štetnih plinova za svaku državu.

3.2. Podaci potrebni za analizu u *Copert-u*

Prvi korak u kreiranju nove baze podataka je unos naziva države i godine za koju se unose podaci. Potreban je i unos podataka o prosječnom trajanju i prosječnom putu prevaljenom u jednoj vožnji, no kako se u Republici Hrvatskoj takva statistika ne vodi uzete su preporučene vrijednosti iz baze podataka *Copert-a*:

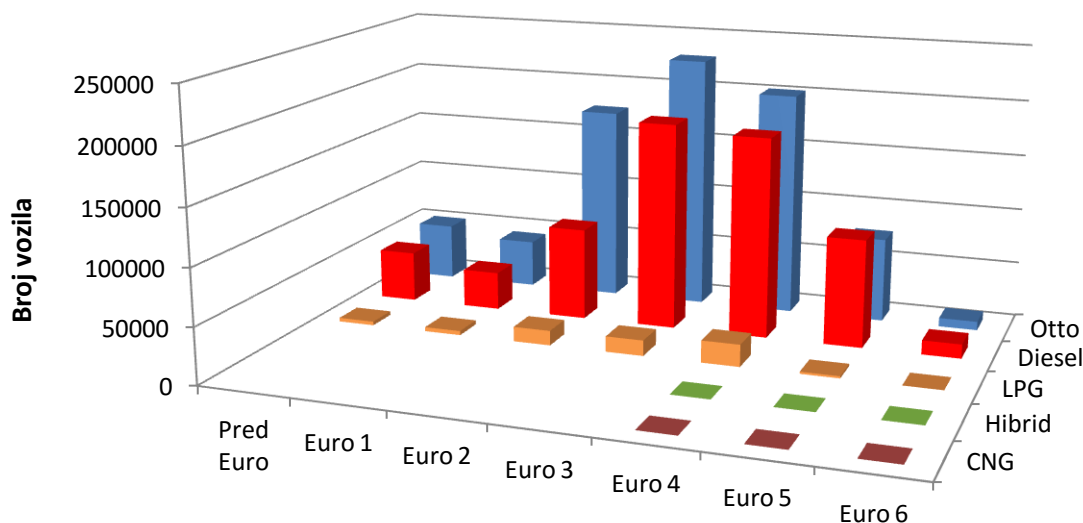
- Država: Hrvatska
- Godina: 2015
- Prosječan put prevaljen u jednoj vožnji: 12 km
- Prosječno trajanje jedne vožnje: 0,25 h (15 min)

Zatim su potrebni podaci o vremenu po mjesecima, tlaku para po Reidu po mjesecima, godišnjoj potrošnji goriva i njihovom sastavu, te broju registriranih vozila u RH kategoriziranih po zapremnini motora i Euro normi. Za podatke koji nisu bili dostupni korištene su preporučene vrijednosti iz baze podataka programskog paketa *Copert*. Ova analiza provedena je za sva vozila kategorije M1 registrirana 2015. godine u RH. U analizi će se prikazati utjecaj emisija štetnih tvari osobnih vozila pogonjenih UNP-om na ukupnu emisiju 1.476.007 osobnih vozila registriranih u Hrvatskoj [22].



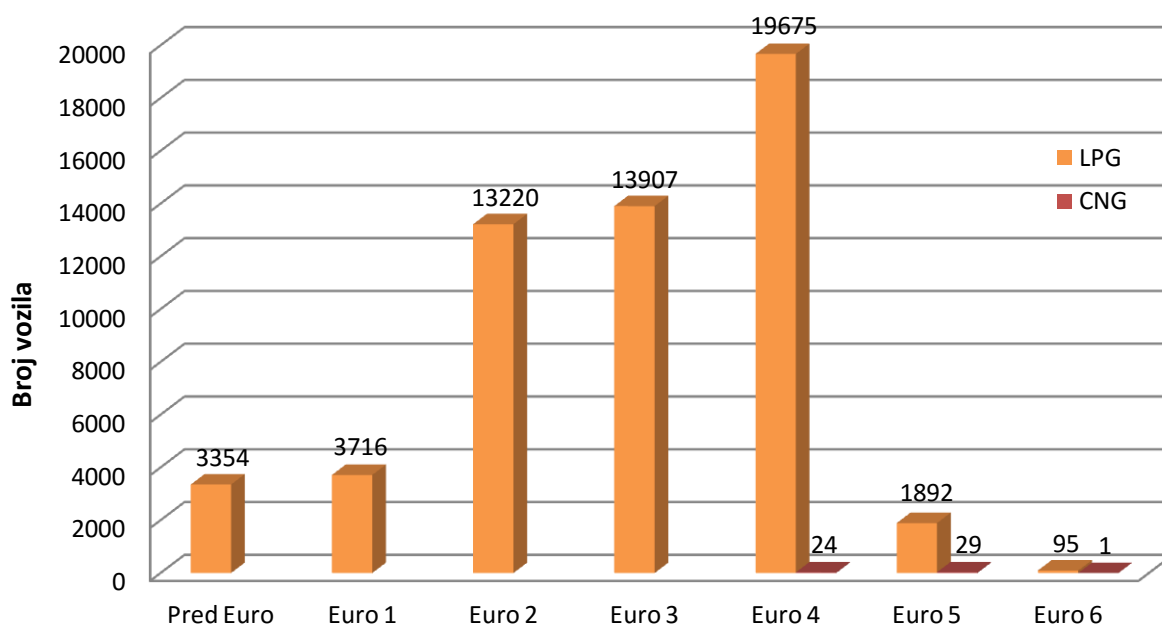
Slika 6. Prikaz udjela registriranih vozila kategorije M1 prema vrsti pogona u RH 2015. god.

Broj registriranih vozila kategorije M1 u RH 2015. god.



Slika 7. Prikaz udjela registriranih vozila kategorije M1 prema vrsti pogona i ograničenju emisija štetnih tvari u RH 2015. god.

Vidljivo je iz dijagrama na slikama 6 i 7 da su vozila s Ottovim i Dieslovim motorima najzastupljenija, dok vozila pogonjena UNP-om čine postotak od tek 3,78 %. Situacija je još gora kada se pogledaju zanemarive brojke vozila pogonjenih SPP-om ili hibridnih vozila. Država sufinancira kupnju električnih i hibridnih vozila do čak 40 %, no za vozila pogonjena plinom takvi poticaji ne postoje [32]. Ipak država pruža neke pogodnosti za vozila pogonjena plinom. Vozači plaćaju manje naknade za okoliš pri tehničkom pregledu, te ne plaćaju naknadu za uporabu javnih cesta uključenu u cijenu litre goriva prema Zakonu o cestama, jer za plinovita goriva ta naknada ne postoji [33].



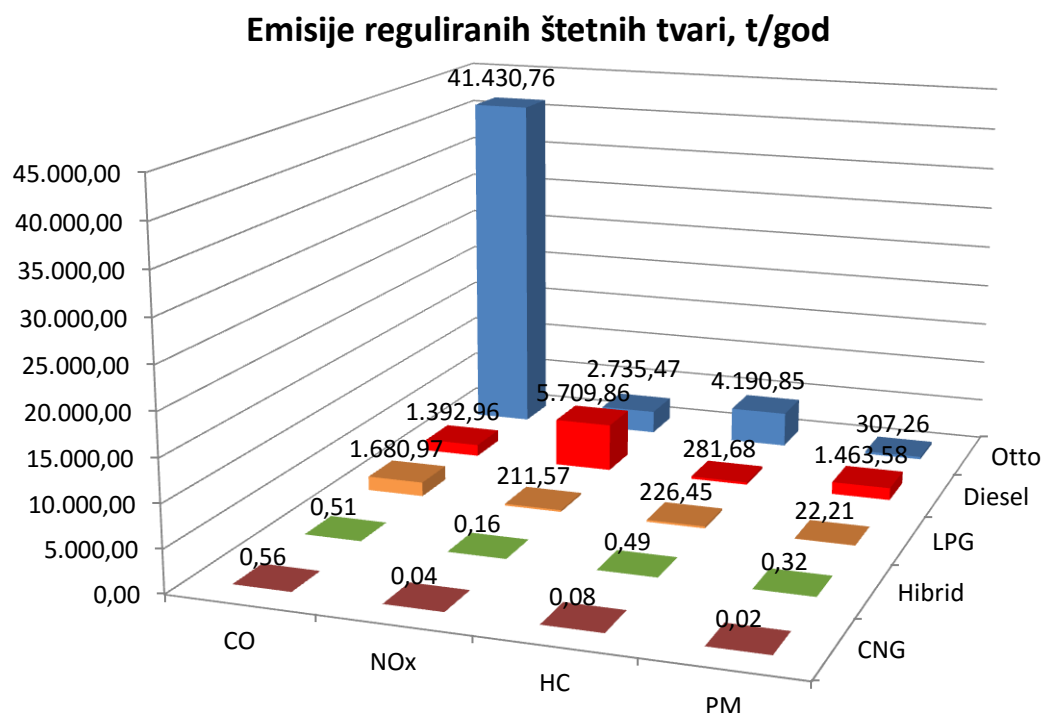
Slika 8. Prikaz udjela registriranih vozila kategorije M1 prema vrsti vozila pogonjenih plinovitim gorivima u RH 2015. god.

Kako bi se značajno smanjilo emitiranje štetnih tvari u okoliš iz cestovnih vozila, broj vozila pogonjenih UNP-om ili nekim drugim alternativnim gorivom bi morao biti usporediv sa brojem Dieselovih i Ottovih motora. A iako iz godine u godinu broj takvih vozila raste, takav drastičan rast se ne može očekivati još godinama, ako ne i desetljećima. Na ruku nam ide jedino činjenica da smo kao članica EU obvezni uvesti razvrstavanje otpada što direktno može doprinjeti proizvodnji bioplina, odnosno biometana iz organskog otpada.

Iz dijagrama na slici 7 je također vidljivo da dominiraju vozila koja zadovoljavaju Euro norme 2, 3 i 4, odnosno norme uvedene 1996., 2000., te 2005. godine, pa se može zaključiti da je vozni park RH zastario.

Na dijagramu sa slike 8 najbolje se vidi dominantnost vozila pogonjenih ukapljenim naftnim plinom pred onima na komprimirani prirodni plin.

3.3. Rezultati analize u Copert-u

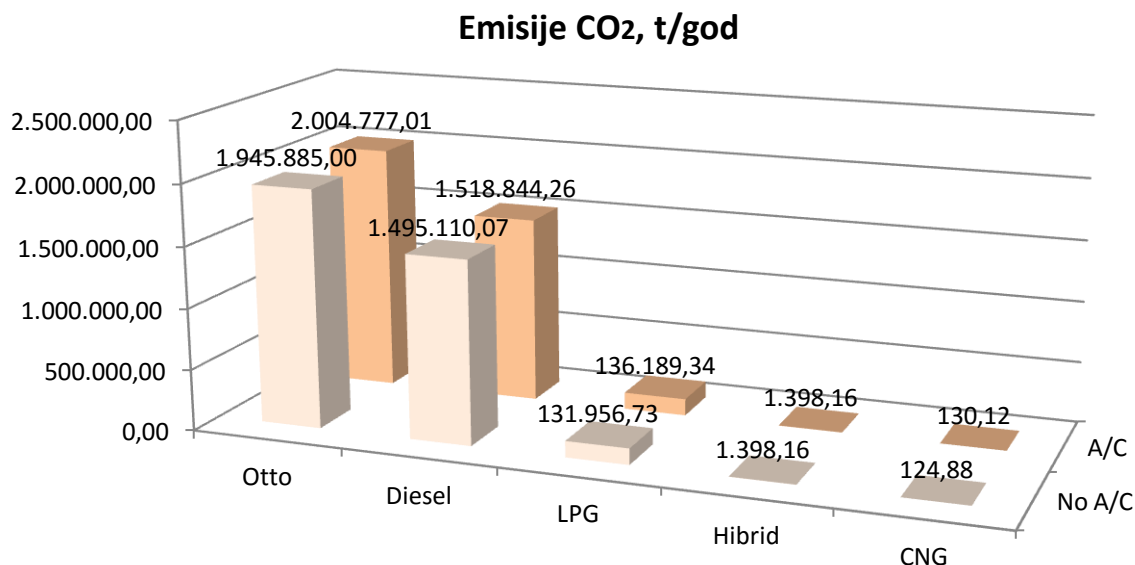


Slika 9. Prikaz udjela vozila kategorije M1 prema razini emisija štetnih tvari u RH 2015. god.

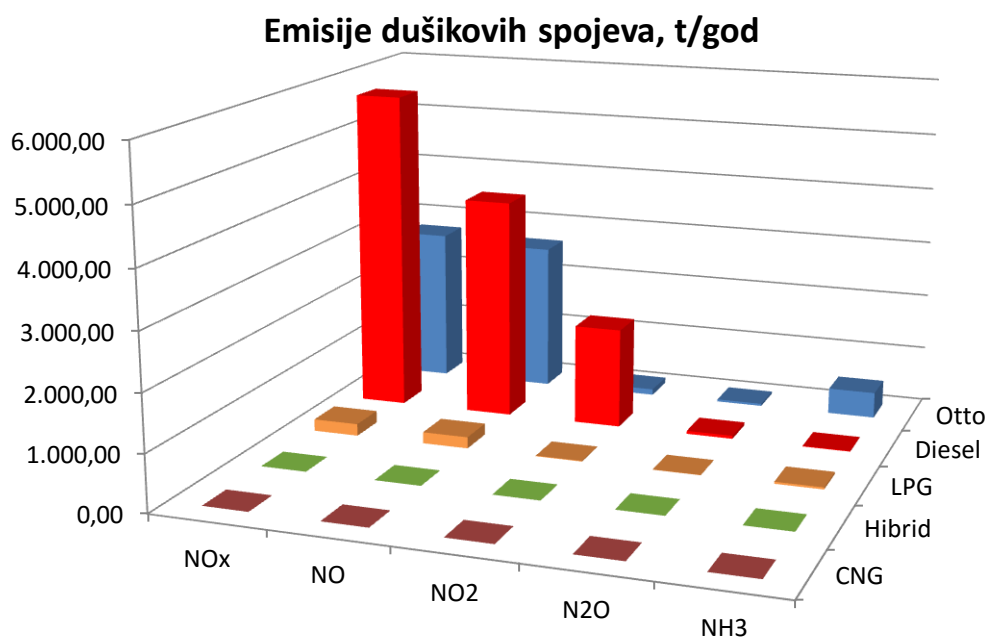
Iz gornjeg dijagrama može se vidjeti količina štetnih tvari koje vozila emitiraju u okoliš na godišnjoj razini prema vrsti pogona. Prema njemu, Ottovi motori daleko najviše emitiraju otrovni CO, dok Dieselovi ispuštaju najviše kancerogenih krutih čestica. U općenitom slučaju ovo i vrijedi, ali emisije CO su ovdje prenapuhane zbog pretpostavke da sva vozila prelaze godišnje isti put, a činjenica je da starija vozila sudjeluju u prometu manje od novijih vozila. Kako vozila prije uvođenja Euro normi nisu imala katalizatore, njihove emisije CO i HC su

bile znatno veće nego za vozila proizvedena da zadovoljavaju čak i prvu u nizu Euro 1 normu.

Copert u proračun uzima u obzir i rad sustava za hlađenje putničkog prostora u vozilu, odnosno klima uređaj, pa je na sljedećem dijagramu pokazana razlika u emisijama stakleničkog plina CO₂ kada je sustav za hlađenje uključen i isključen. U prosjeku je emisija CO₂ povećana za preko 2 % kada je klima uređaj uključen, osim u hibridnim vozilima gdje se kompresor pogoni električnom energijom.



Slika 10. Emisije CO₂ pri vožnji s uključenim i isključenim klima uređajem



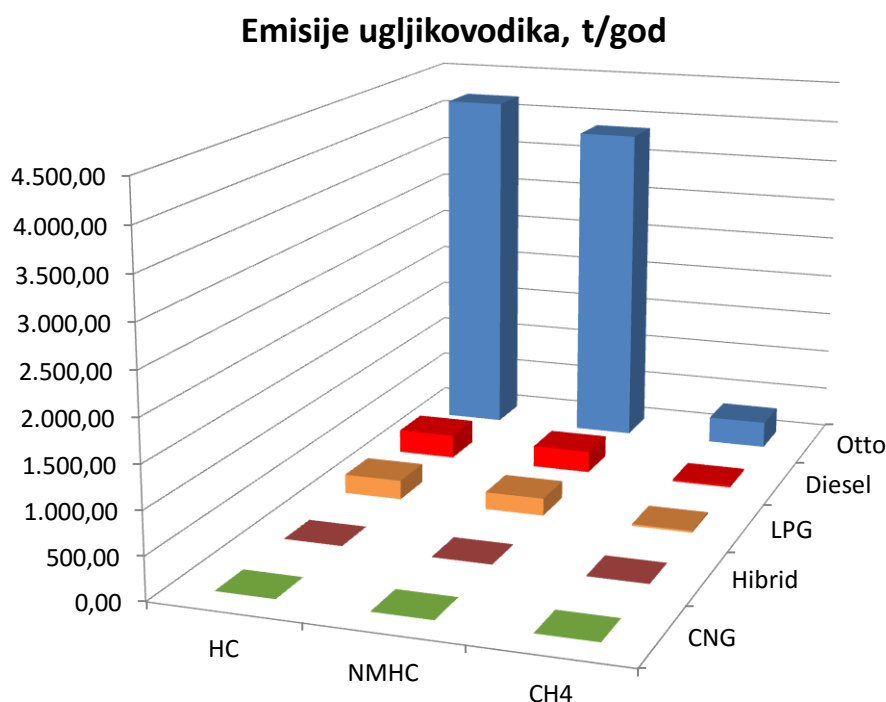
Slika 11. Emisije dušikovih spojeva NO, NO₂, N₂O i NH₃

Dušikovi oksidi (NO_x) su spojevi jedne molekule dušika i jedne ili više molekule kisika, u najvećem broju slučajeva to su NO i NO_2 . Nastanak dušikovih oksida sa brojem molekula kisika većim od 2 je iznimno rijedak. Ovi oksidi su posebno opasni za okoliš jer reagiraju s vlagom stvarajući kisele kiše. Diesellovi motori ih ispuštaju u najvećoj količini. U dijagramu je prikazan njihov zbroj, te svaki spoj zasebno, a uz to su prikazani i spojevi N_2O i NH_3 .

Didušikov oksid (N_2O) je staklenički plin i štetan je jer u reakciji sa sunčevim zrakama razara ozon (O_3) koji se nalazi u Zemljinoj stratosferi, te tako pospješuje stvaranje ozonskih rupa.

Emisije amonijaka (NH_3) su dominantne u Ottovim motorima koji koriste trokomponentni katalizator. U njemu dolazi do redukcije dušikovih oksida u dušik i kisik, no u nepovoljnim uvjetima izgaranja dolazi do daljnje redukcije u amonijak. Amonijak nije opasan za ljude, no klasificiran je kao vrlo opasan za okoliš jer su vrlo male i razrijeđene količine veoma toksične i pogubne za morske životinje.

Amonijak se u Diesellovim motorima javlja pak kod korištenja redukcijskog katalizatora koji reducira dušikove okside u dušik i vodu, no pomoću tekućine uree. Za pravilan rad je potrebno vrlo precizno doziranje te tekućine jer se u slučaju premale doze i dalje u ispuhu javlja značajna količina NO_x , a u slučaju prevelike doze, dolazi do pojavljivanja amonijaka u ispuhu.

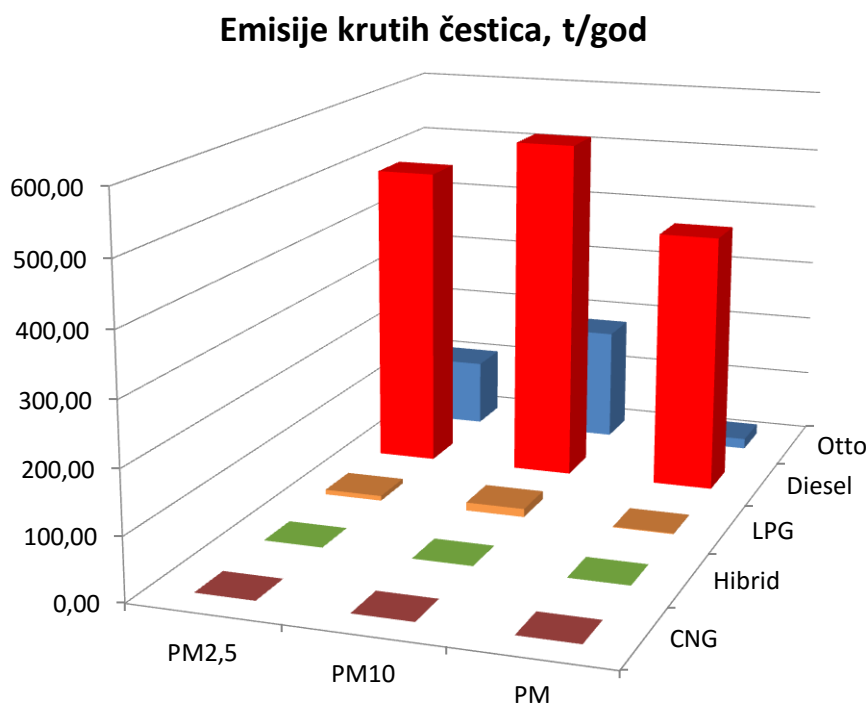


Slika 12. Emisije ugljikovodika

Tekuće smjese ugljikovodika su lako isparive i vrlo zapaljive, a vozilo ih emitira ne samo iz ispuha pri nepotpunom izgaranju goriva, već i isparavanjem goriva. U ispuhu Ottovih motora pojavljuju se puno veće količine HC i CO nego što je to slučaj kod Diesellovih motora. No,

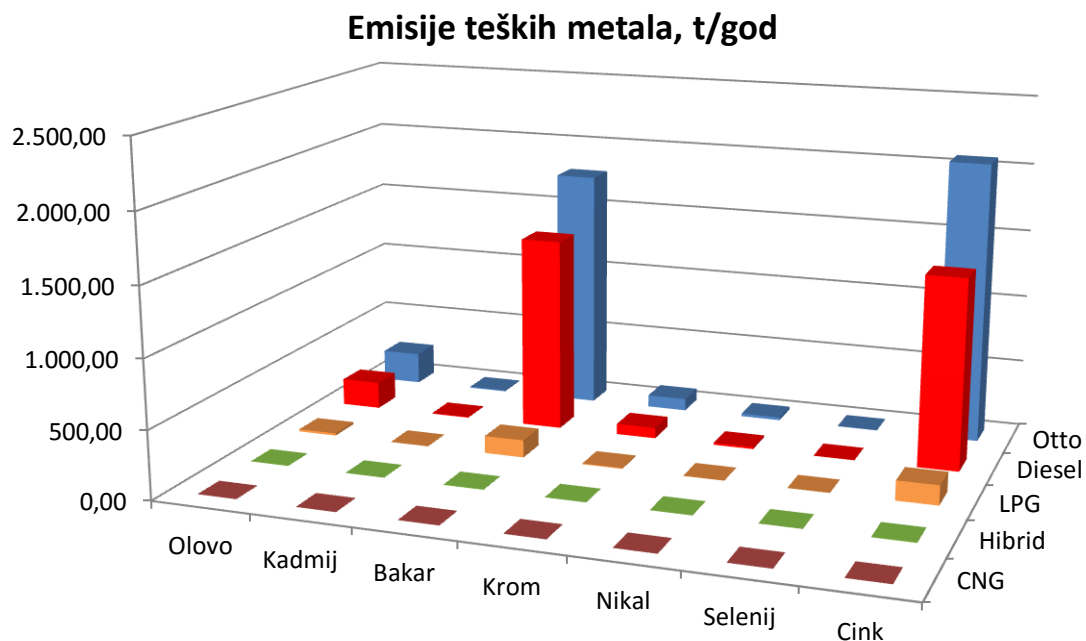
ugljikovodici nastali izgaranjem u Ottovim motorima su niskomolekularni, te djeluju nadražujuće, dok su ugljikovodici iz Dieselovih motora visokomolekularni i imaju toksično djelovanje.

Suma metana (CH_4), koji je ujedno i staklenički plin, i nemetanskih ugljikovodika (NMHC) čine totalne ugljikovodike (THC ili HC). Kako se radi o stakleničkom plinu, njegove je emisije poželjno smanjiti, no trenutno ne postoji zakonsko ograničenje.



Slika 13. Emisije krutih čestica

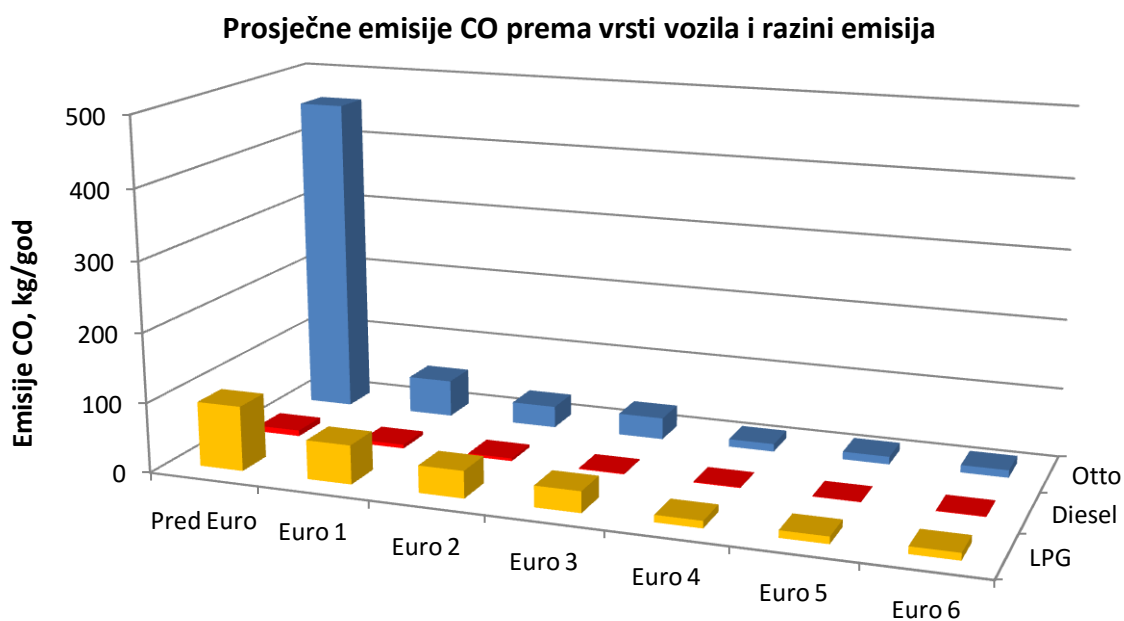
Krute čestice koje se sastoje uglavnom od čađe, odnosno neizgorenog ugljika (C) dominantne su u ispuhu Dieselovih motora, odnosno motora sa direktnim ubrizgavanjem goriva u cilindar. U takve motore gorivo se ubrizgava pri vrlo visokim tlakovima, te raspršuje u sitne kapljice kako bi mješanje sa komprimiranim zrakom bilo što bolje. Kako se gorivo ubrizgava tek pred kraj takta kompresije, vrijeme potrebno za pripremu smjese nije dovoljno dugo, te se na lokalnim mjestima pojavljuje manjak zraka koji dovodi do nepotpunog izgaranja. Rezultat toga je nastanak čestica promjera od samo nekoliko mikrometara. Čestice na dijagramu su podjeljene na one veličine $2,5\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$, te većima od toga. Krute čestice izazivaju razna kancerogena i plućna oboljenja.



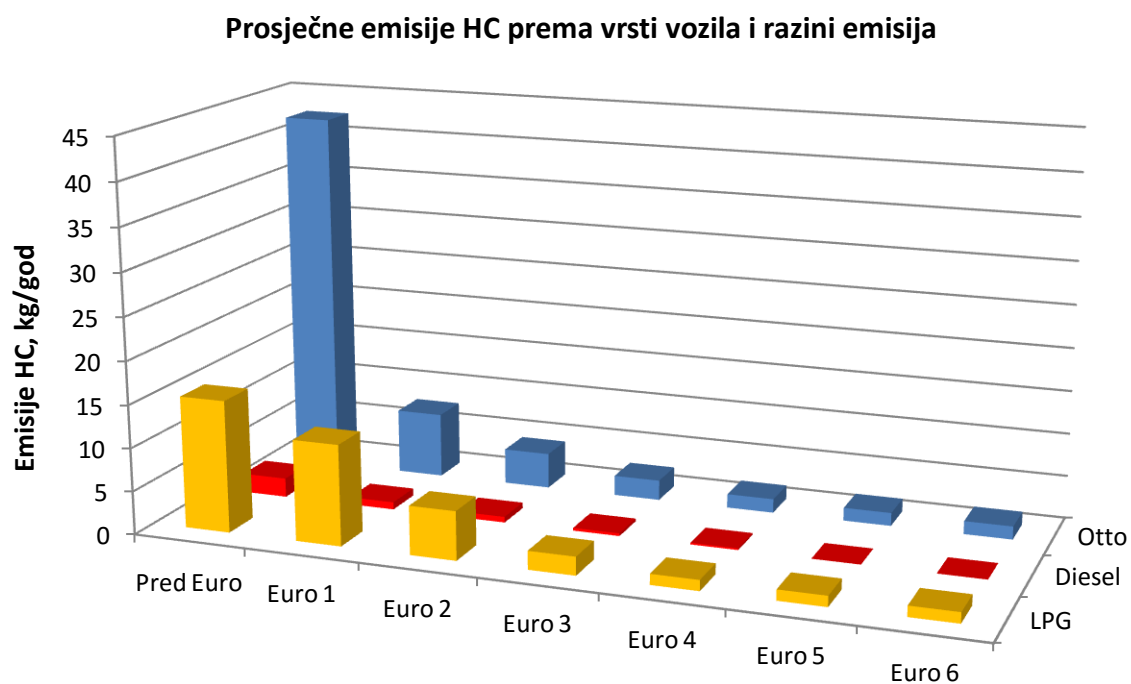
Slika 14. Emisije teških metala

Može se vidjeti iz dijagrama na slici 14 da osim već navedenih štetnih tvari, vozila ispuštaju u okoliš i na desetke teških metala od kojih su bakar i cink najdominantniji.

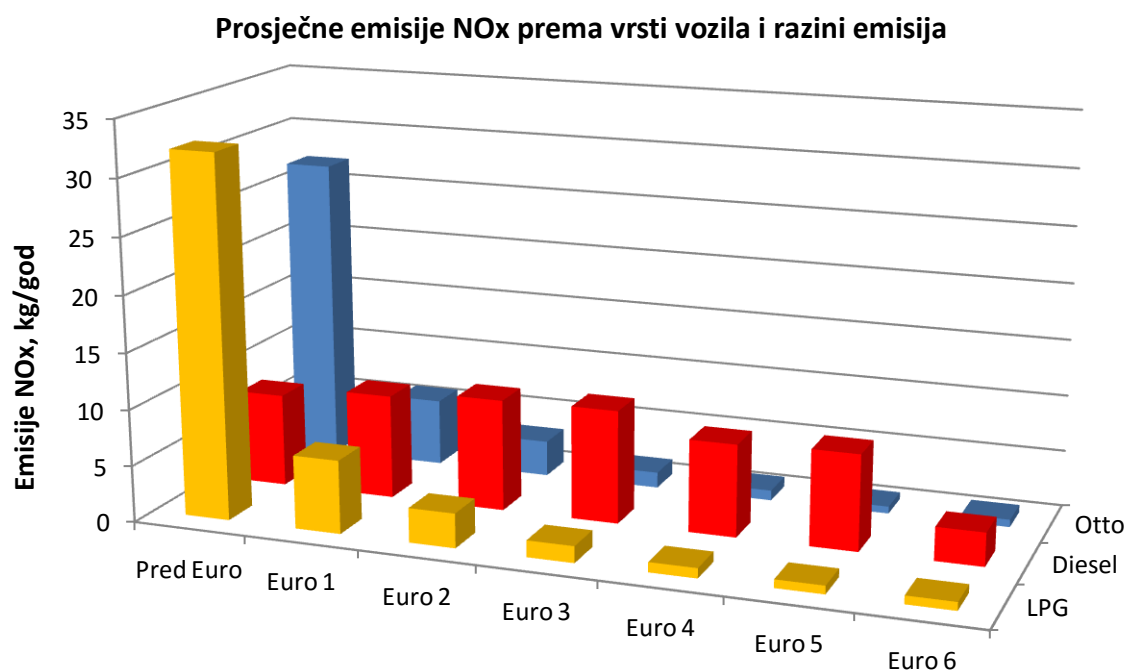
Na sljedećim dijagramima prikazane su najštetnije tvari iz ispuha vozila prema Euro normama. Vidljivo je da sve strože norme imaju željeni učinak smanjenja emisija svih štetnih tvari.



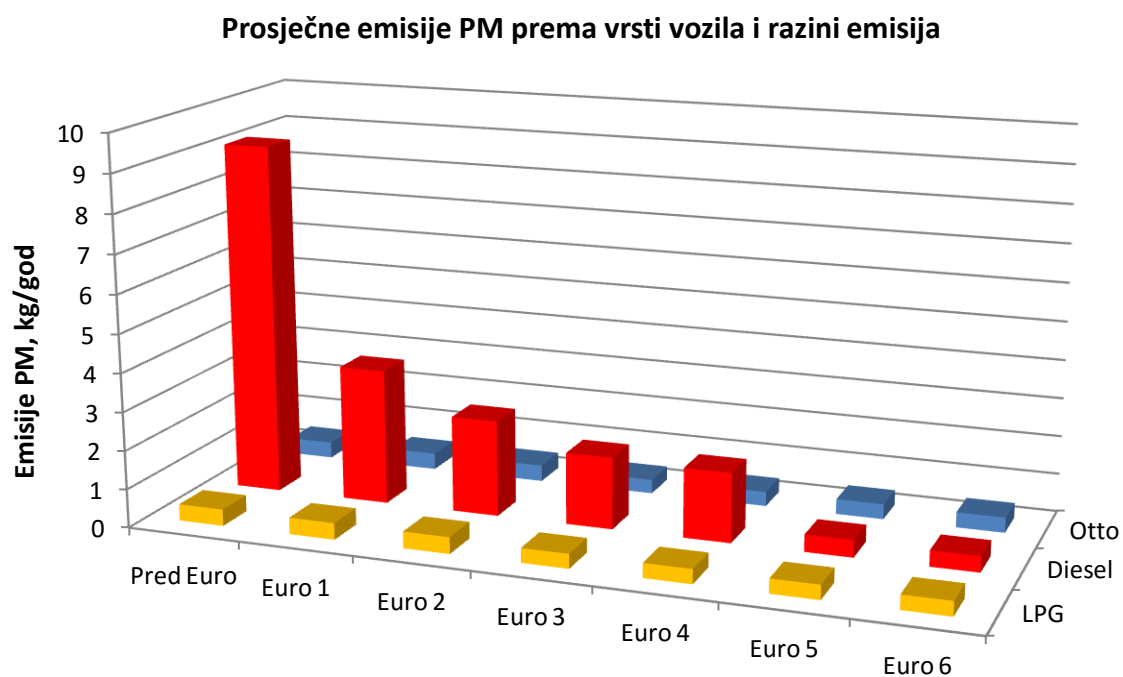
Slika 15. Prosječne emisije CO iz vozila kategorije M1 prema vrsti pogona i razini emisija štetnih tvari



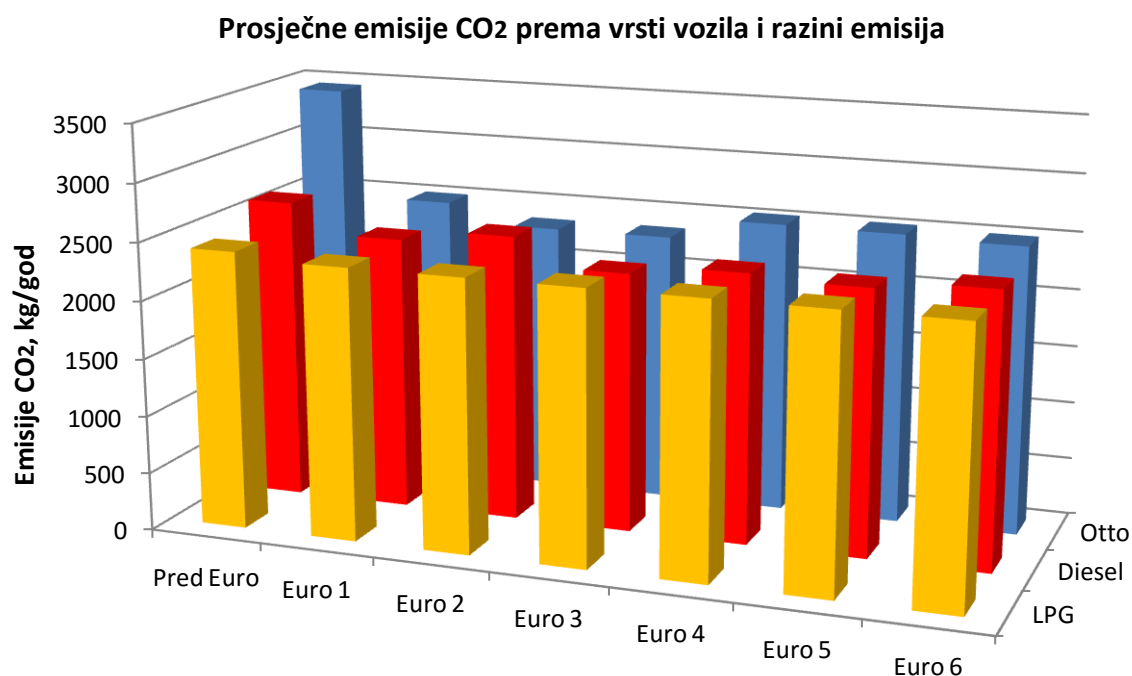
Slika 16. Prosječne emisije HC iz vozila kategorije M1 prema vrsti pogona i razini emisija štetnih tvari



Slika 17. Prosječne emisije NO_x iz vozila kategorije M1 prema vrsti pogona i razini emisija štetnih tvari



Slika 18. Prosječne emisije PM iz vozila kategorije M1 prema vrsti pogona i razini emisija štetnih tvari



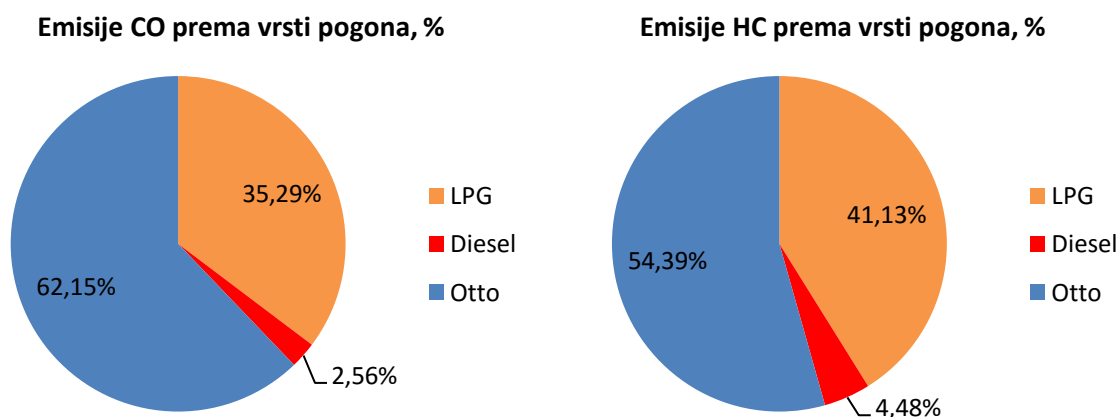
Slika 19. Prosječne emisije CO₂ iz vozila kategorije M1 prema vrsti pogona i razini emisija štetnih tvari

Vidi se iz dijagrama da su vozila prije uvođenja Euro normi ispuštala znatno veće količine emisija štetnih tvari bez obzira o kojem se pogonu radilo.

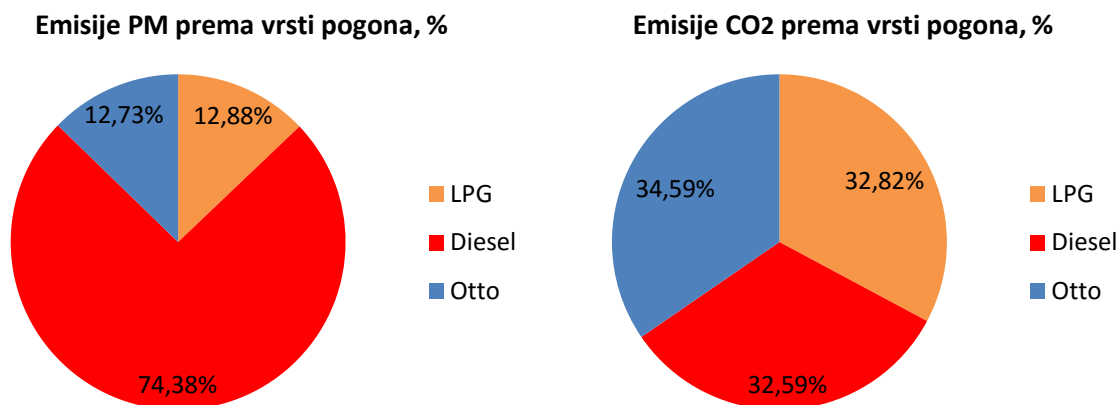
S obzirom na relativno mali broj vozila pogonjenih UNP-om u odnosu na vozila s uobičajenim Dieslovim i Ottovim motorima, iz prethodnih dijagrama se vidi da količine emisija štetnih tvari koje emitiraju starija vozila nisu beznačajne, dok noviji motori koji zadovoljavaju Euro 5 i 6 norme emitiraju znatno manje količine istih.

3.4. Udio emisija štetnih tvari prema vrsti pogona

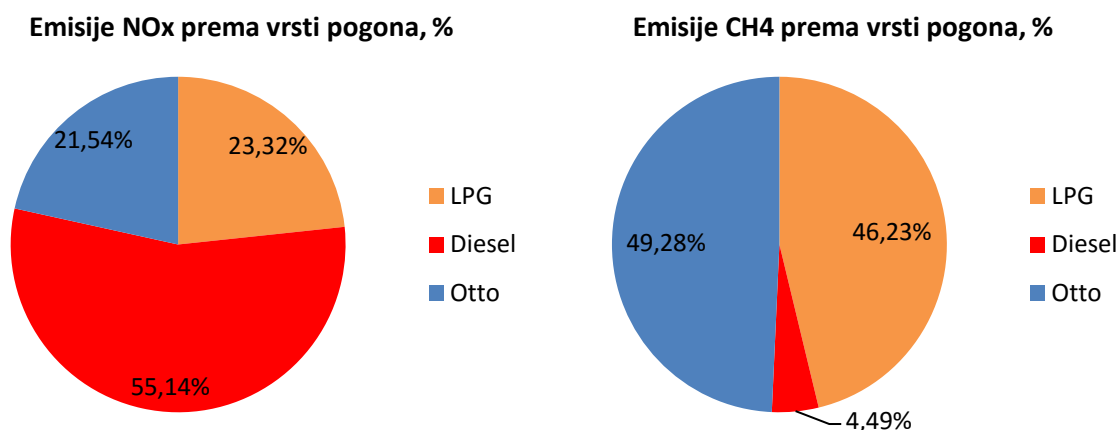
Radi boljeg uvida utjecaja štetnih emisija u vozilima pogonjenima plinom na ukupnu emisiju osobnih vozila u Hrvatskoj, izračunate su prosječne emisije najznačajnijih štetnih tvari prema vrsti pogona po jednom vozilu. To su emisije CO, HC, NO_x i PM, te emisije stakleničkih plinova CO₂ i CH₄. Taj utjecaj prikazan je na slijedećim dijagramima prema vrsti pogona. Analiza hibridnih vozila i vozila pogonjenih SPP-om nije prikazana zbog nedovoljnog broja uzoraka.



Slika 20. Prosječne emisije CO i HC jednog osobnog vozila kategorije M1 prema vrsti pogona



Slika 21. Prosječne emisije PM i CO₂ jednog osobnog vozila kategorije M1 prema vrsti pogona



Slika 22. Prosječne emisije NO_x i CH₄ jednog osobnog vozila kategorije M1 prema vrsti pogona

Dijagrami sa slika 20, 21 i 22 prikazuju nam već poznato; vozila pogonjena Diesellovim motorima emitiraju najmanje emisije CO, HC, te CH₄, a emitiraju daleko najveće količine NO_x i PM, dok vozila pogonjena Ottovim motorima ispuštaju najveće emisije CO i HC. Emisije CO₂ su podjednake za sva tri pogona.

Velika većina, ako ne i sva vozila pogonjena UNP-om u Hrvatskoj su bivalentna. Prema tome, iz ove analize je najbolje uspoređivati bivalentna vozila sa vozilima s Ottovim motorima.

Prema dijagramima se može vidjeti da UNP kao gorivo u Ottovim motorima ima osjetni utjecaj samo na emisije CO i HC, dok su razlike između emisija ostalih štetnih tvari neznatne. Smanjenje emisija CO u vozilima pogonjenim UNP-om u odnosu na Ottove motore je 27 %, dok smanjenje emisija HC iznosi 13 %.

Iz analize se može zaključiti da starost vozila direktno utječe na emisije pojedinih štetnih tvari iz vozila. Nažalost, Hrvatska se ne može pohvaliti u tom pogledu, jer je prosječna starost osobnih vozila kategorije M1 registriranih u RH 2015. godine iznosila preko 12 godina. Zamjenom postojećeg voznog parka motornih vozila koja ne zadovoljavaju barem Euro 3 normu značajno bi se pridonjelo smanjenju ukupnih emisija štetnih tvari u Hrvatskoj.

4. Ispitivanje vozila u CVH

4.1. Opis ispitivanja

Ispitivanja, odnosno mjerenja na vozilima pogonjenim UNP-om su provedena u stanicama za tehnički pregled vozila Centra za vozila Hrvatska. Bivalentna ili *bi-fuel* vozila pogonjena UNP-om i/ili benzinom su pri dolasku na obvezni godišnji tehnički pregled ispitivana u skladu s važećim propisima, no uz to su se još provodila mjerenja emisija ispušnih plinova pri radu motora, prvo na benzin, a potom i na UNP i to pri praznom i povišenom hodu, odnosno niskom i visokom opterećenju motora. Kako je već ranije spomenuto, vozila pogonjena UNP-om nisu obvezna u Hrvatskoj obavljati takozvani Eko test, odnosno test pri kojem se mjeri količina štetnih tvari u ispušnim plinovima. Prema tome, ne postoji nikakav zapis, odnosno kontrola emisija ispušnih plinova takvih vozila. Ispitivanje se odvijalo diljem Hrvatske i provedeno je na ukupno 497 vozila.

U tablici 13 prikazan je broj vozila u odnosu na Euro normu koju vozilo zadovoljava, te još neki bitni podaci za analizu.

Tablica 13. Broj vozila prema razini ograničenja, godini proizvodnje i prijađenom putu

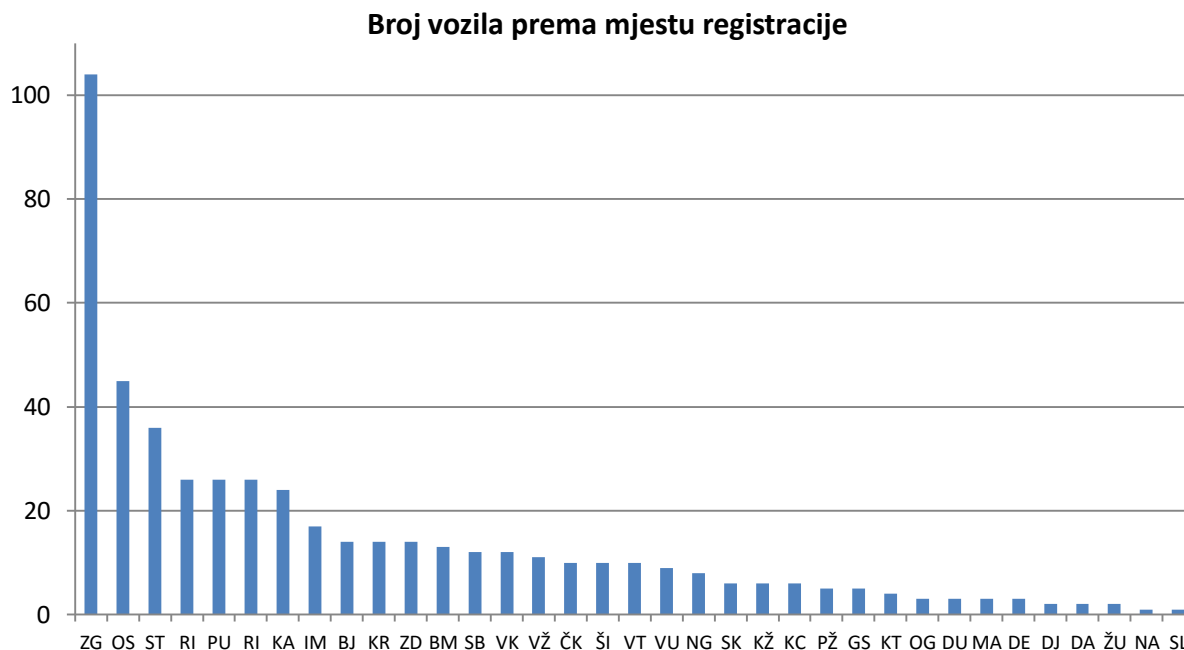
Broj vozila	Razina ograničenja emisija vozila	Prosječna starost vozila, godine	Prosječni prijeđeni put vozila, km
0	Euro 1	-	-
90	Euro 2	18	255762
95	Euro 3	14	209531
159	Euro 4	9	155170
21	Euro 5	6	103039
1	Euro 6	0	34
131	Nije definirano	16	204632
Ukupno: 497	-	13	193752

Kako podatak o razini ograničenja emisija nije poznat za 131 vozilo, ta vozila će biti izuzeta iz analize o utjecaju razine ograničenja na ukupne emisije ispitivanih vozila.

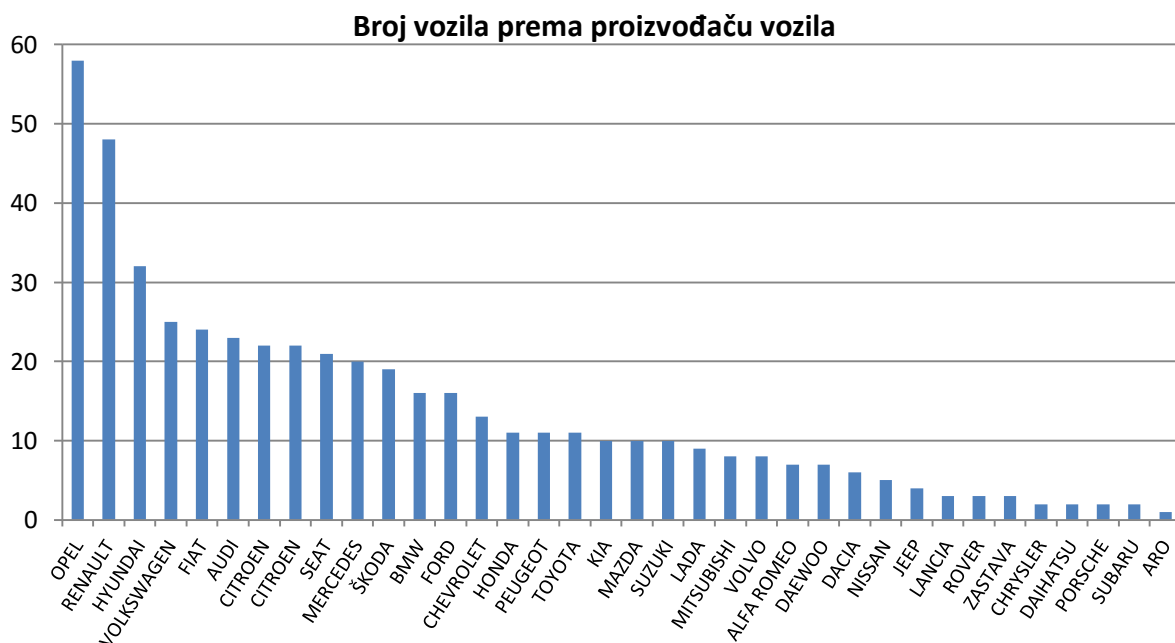
Kako je u ispitivanju sudjelovalo samo jedno vozilo s razinom ograničenja emisija Euro 6, te niti jedno vozilo s razinom Euro 1, te se razine neće uzeti u obzir u analizi.

No, za analizu o utjecaju starosti vozila na ukupne emisije štetnih tvari, sva će se ispitivana vozila uzeti u obzir.

Na slikama 23 i 24 su prikazani brojevi ispitivanih vozila prema mjestu registracije, te proizvođaču, odnosno marki vozila. Vidi se da je najveći dio vozila registriran u Zagrebu, te drugim većim gradovima Hrvatske, te da je u ispitivanju sudjelovalo najviše vozila marke Opel, a slijede ih Renault i Hyundai.



Slika 23. Prikaz broja ispitivanih vozila prema mjestu registracije



Slika 24. Prikaz broja ispitivanih vozila prema proizvođaču vozila

Kako bi se izmjerile emisije štetnih tvari iz ispušnih plinova, potrebno je postaviti na vozilo nekoliko osjetnika koji su dio posebnog uređaja za mjerenje, a koji se zove analizator ispušnih plinova. Centar za vozila Hrvatska u svojim stanicama za tehnički pregled raspolaže sa nekoliko tipova analizatora, a između ostalih je i analizator proizvođača Bosch kakav se može vidjeti na slici 25. Ovakav analizator može mjeriti emisije CO, HC, CO₂ i O₂, te na temelju izmjerenih vrijednosti izračunava faktor pretička zraka (λ). Faktor pretička zraka predstavlja omjer goriva i zraka. Ako je λ manji od 1 to znači da je smjesa zraka i goriva bogata, odnosno postoji višak goriva (ili manjak zraka). Ako je pak veći od 1, govori se o

siromašnoj smjesi, odnosno u smjesi je manjak goriva (ili višak zraka). Ako je jednak 1 govorimo o stehiometrijskoj smjesi, odnosno u smjesi je upravo onoliko zraka koliko je potrebno za potpuno izgaranje 1 kg goriva. Pošto snaga i moment ovise o bogatstvu smjese, to znači da će s manjim faktorom zraka te vrijednosti biti veće, no specifična potrošnja goriva će biti veća, s time da se granice upaljivosti benzina i zraka približno kreću između vrijednosti 0,5 i 1,3 [1].



Slika 25. Analizator ispušnih plinova proizvođača Bosch tip BEA [34]

Kako je većina vozila s Ottovim motorima opremljena trokomponentnim katalizatorom, bitno je da takva vozila rade sa stehiometrijskom smjesom, jer katalizator ima najviši stupanj pretvorbe kada faktor zraka iznosi $1 (\pm 3 \%)$ [1].

Vozilo se spaja na analizator preko nekoliko osjetnika. Za očitavanje broja okretaja motora, na vozilo se spajaju dvije stezaljke, jedna na pozitivan pol akumulatora, a druga na masu vozila. Na taj se način mjere oscilacije napona punjenja akumulatora čime se može dobiti brzina vrtnje motora. Za očitavanje radne temperature motora koristi se osjetnik temperature ulja koji se umeće u karter ulja, a za sakupljanje ispušnih plinova u komoru koja se nalazi u uređaju, umeće se u ispušnu cijev vozila sonda za uzimanje uzoraka.

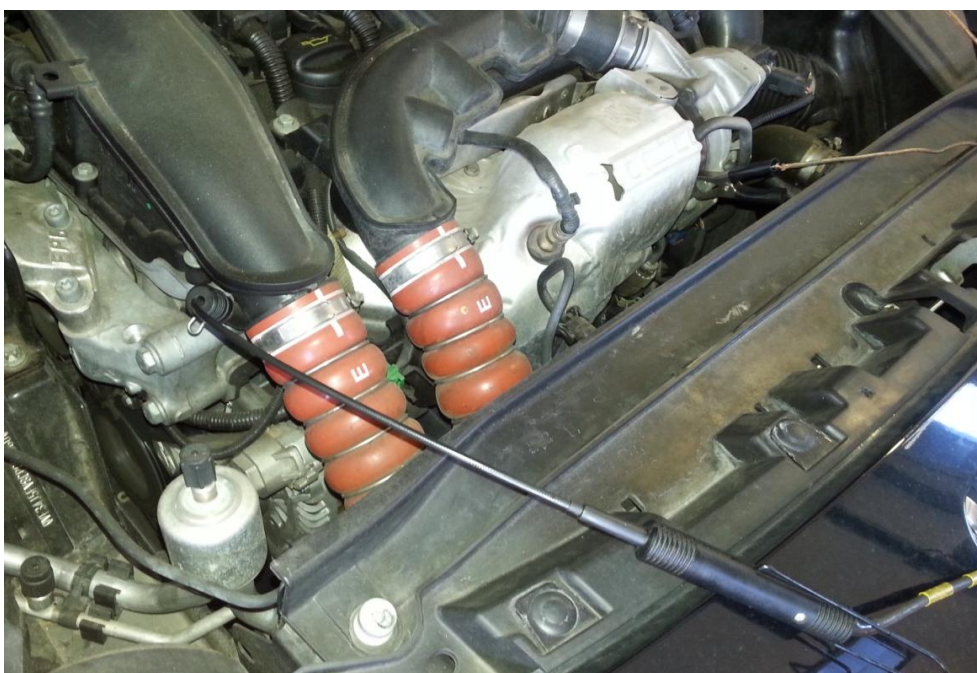
Da bi vrijednosti emisija bile u dopuštenim granicama, bitno je da se katalizator prethodno zagrije. Vrijeme zagrijavanja je propisano od strane proizvođača vozila, a ako podaci nisu poznati uzimaju se zakonske vrijednosti. Prva faza ispitivanja obavlja se na radnoj temperaturi motora, pri povećanoj brzini vrtnje, a druga faza ispitivanja obavlja se na radnoj temperaturi motora u praznom hodu. Mjere se emisije CO, CO₂, HC, O₂, te faktor zraka λ . Na kraju ispitivanja se svi podaci mogu isprintati.

Na sljedećim slikama prikazan je postupak mjerenja analizatorom ispušnih plinova u jednoj od stanica za tehnički pregled tvrtke CVH.



Slika 26. Spajanje stezaljki

Na slici 26 se vide stezaljke, crvena je spojena na pozitivan pol akumulatora, a crna na masu vozila, dok je na slici 27 prikazan osjetnik temperature ulja.



Slika 27. Umetanje osjetnika temperature u karter ulja

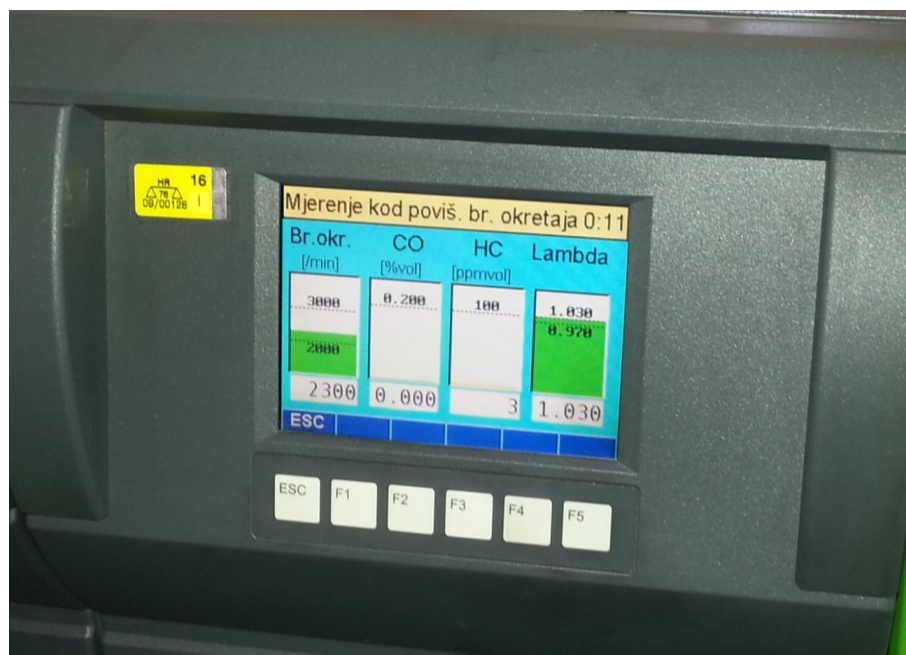


Slika 28. Umetanje sonde za uzimanje uzoraka u ispušnu cijev vozila

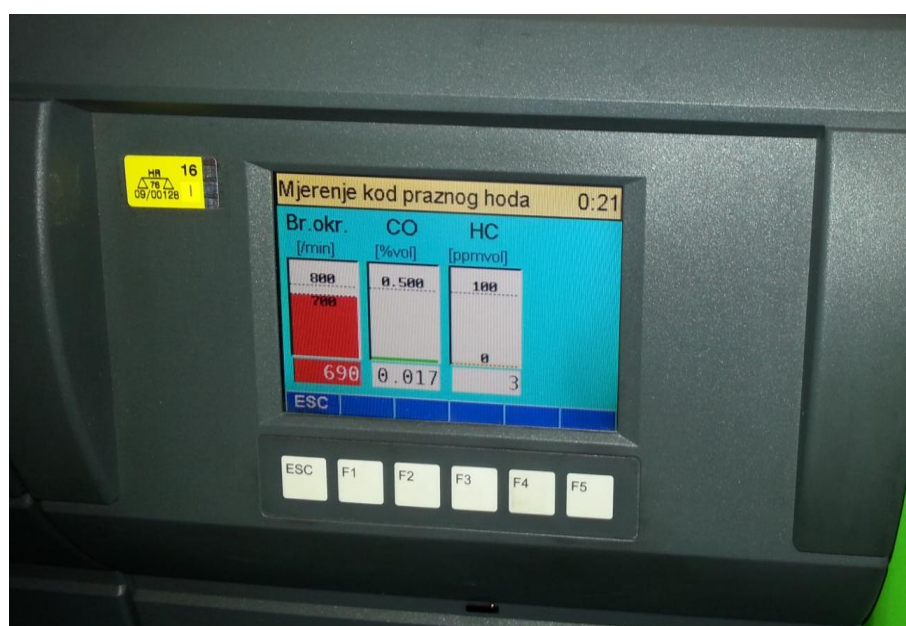
Na slici 28 je prikazana sonda koja je umetnuta u ispušnu cijev vozila, a iza vozila se nalazi cijev kojom se odводе plinovi iz prostorijske u kojoj se obavlja mjerenje radi sigurnosnih i zdravstvenih razloga.



Slika 29. Zagrijavanje motora, odnosno katalizatora na radnu temperaturu



Slika 30. Mjerenje emisija pri praznom hodu



Slika 31. Mjerenje emisija pri povišenom hodu

Pomoću sonde za uzimanje uzoraka plinovi se odvođe u komoru koja se nalazi u analizatoru ispušnih plinova, te se mjere volumni postotci štetnih tvari u ukupnom sadržaju. Nakon što su svi osjetnici spojeni, motor se pali, te se zagrijava na radnu temperaturu kako bi katalizator radio ispravno. Naime, za veći stupanj pretvorbe u katalizatoru potrebna je i veća temperatura. Na slikama 29, 30 i 31 su prikazane informacije koje računalo analizatora pruža operatoru. Prethodno operator treba odabrati nekoliko parametara poput tipa vozila, broja cilindara i sl. Kada se obave sva mjerenja, računalo printa papir sa svim izmjerenim vrijednostima emisija, a primjer dobivenih podataka jednog ispitivanja prikazan je na slici 30.

B o s c h
EKO test
Rezultat ispitivanja

Mjesto ispitivanja
H152 CVH STP ZAGREB 1

BEA-Verzija: V3.20-EU-OST
AMM verzija: 000-B6

Datum: 28.06.2016
Vrijeme: 11:11

REZULTATI

Temperatura ulja[°C]
min: 85 mjer: 85

Mjerenje u praznom hodu

Broj okret.	690	/min
Lambda	1.004	
CO	0.009	% vol
CO2	14.69	% vol
HC	3	ppm vol
O2	0.09	% vol
COcor	0.009	% vol

Povišen br. okretaja

Broj okret.	2350	/min
Lambda	0.999	
CO	0.000	% vol
CO2	15.26	% vol
HC	3	ppm vol
O2	-0.01	% vol
COcor	0.000	% vol

UKUPNI REZULTAT

Mjerenje u praznom hodu:
Broj okret. (700-800)
CO (0.50) OK

Povišen br. okretaja:
Broj okret. (2000-3000)
CO (0.20) OK
Lambda (0.97-1.03) OK

Ispitivanje zadovoljava

Slika 32. Prikaz svih dobivenih vrijednosti mjerenih emisija pri ispitivanju jednog vozila

Na papiru se također ispisuje je li vozilo zadovoljilo na Eko testu, a ukoliko ne zadovolji, to vozilo se ne može registrirati, dok ne ponovi test sa prolaznom ocjenom.

4.2. Analiza izmjerenih vrijednosti pri ispitivanju

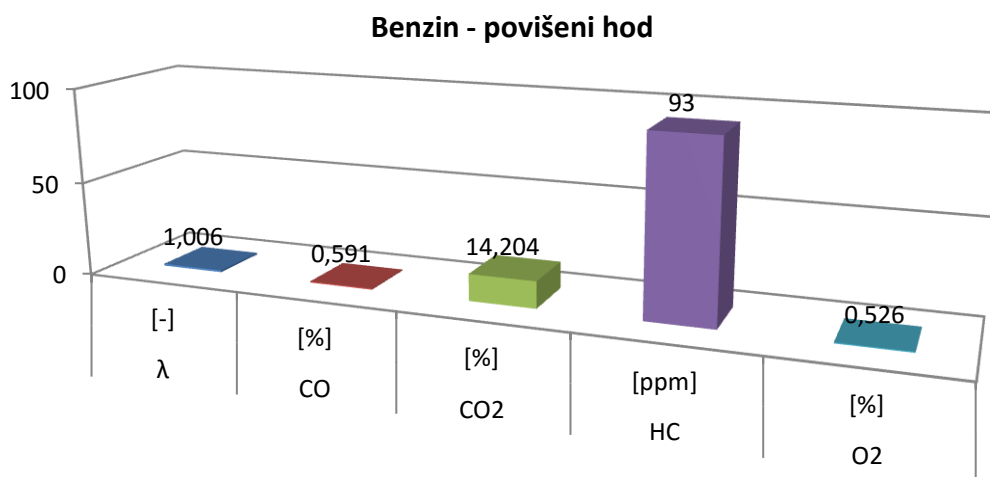
Iz podataka dobivenih mjerenjima mogu se napraviti sljedeće analize:

- Utjecaj opterećenja motora i vrste goriva na emisije ispušnih plinova
- Utjecaj razine ograničenja na emisije ispušnih plinova
- Utjecaj starosti i prijeđenog puta vozila na emisije ispušnih plinova
- Analiza prolaznosti ispitivanih vozila na Eko testu

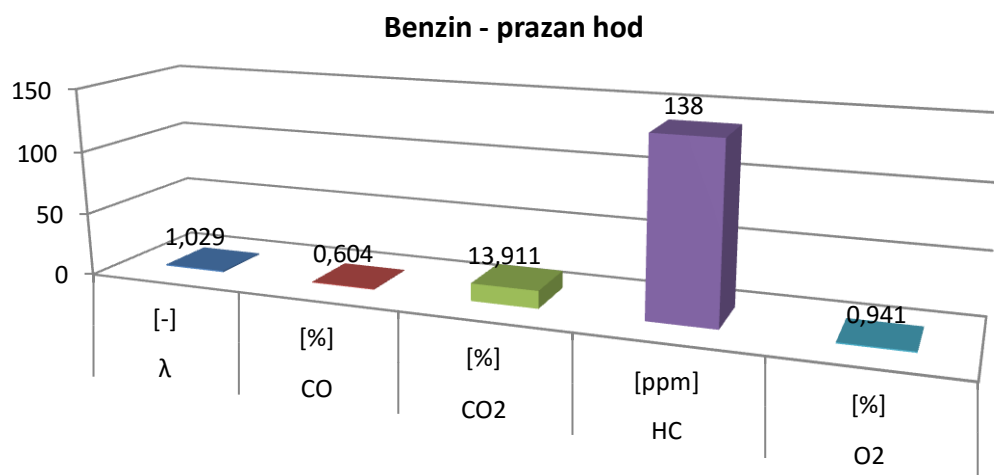
4.2.1 Utjecaj opterećenja motora i vrste goriva na emisije ispušnih plinova

Kako su se mjerenja provodila pri praznom i povišenom hodu i pri pogonu sa dva različita goriva; benzinom i UNP-om, može se provesti usporedba dobivenih rezultata.

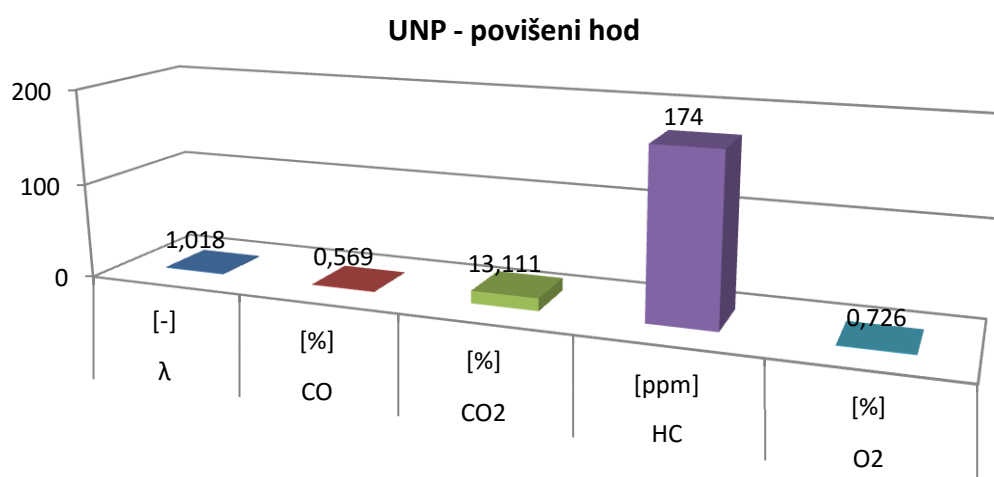
Dijagrami sa slika 33, 34, 35 i 36 prikazuju prosječne vrijednosti izmjerenih vrijednosti svih vozila koja su sudjelovala u ispitivanju. Kako Ottovi motori rade sa stehiometrijskom gorivom smjesom, udio kisika u ispuhu će biti minimalan. U trokomponentnom katalizatoru se odvija niz kemijskih reakcija koje uključuju oksidaciju spojeva CO i HC u CO_2 , H_2 i H_2O i redukciju spojeva NO_x u N_2 , CO_2 i H_2O . Prvo se odvija redukcija dušikovih oksida čime se oslobađa kisik koji potom služi za pretvorbu CO i HC u manje štetni CO_2 i vodenu paru. Kako je već ranije rečeno, trokomponentni katalizator radi najbolje u uskom području faktora zraka ($\lambda \approx \pm 1,03$). Iz dijagrama je vidljivo da je faktor zraka manji pri povišenom hodu, bez obzira kojim gorivom je motor pogonjen, što znači i bolju pretvorbu u katalizatoru, pa su emisije CO i HC manje, no zbog toga su emisije CO_2 veće. Također, pri povišenom hodu motora, temperatura u katalizatoru poprima veće vrijednosti i time povećava stupanj pretvorbe. Dakle, može se zaključiti da općenito katalizator radi bolje pri povišenom hodu.



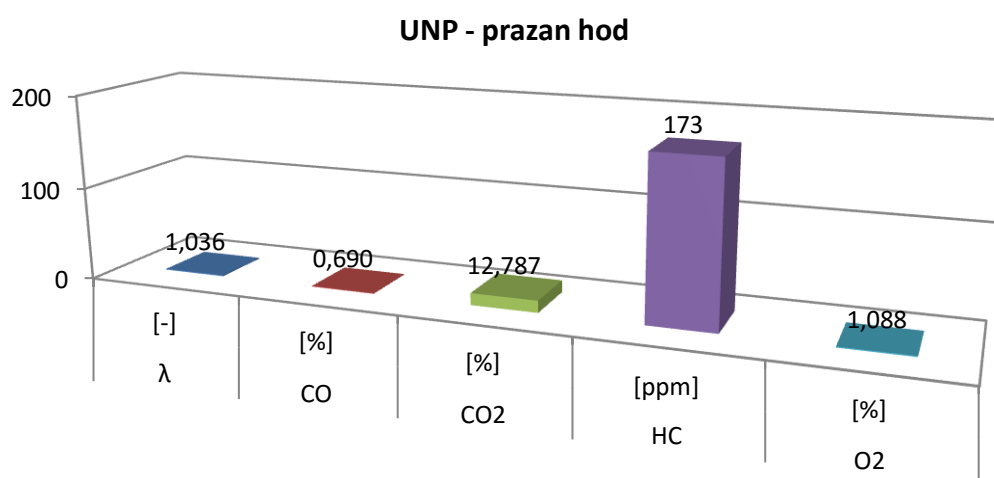
Slika 33. Prosječne izmjerene vrijednosti pri povišenom hodu pri pogonu benzinom



Slika 34. Prosječne izmjerene vrijednosti pri praznom hodu pri pogonu benzinom

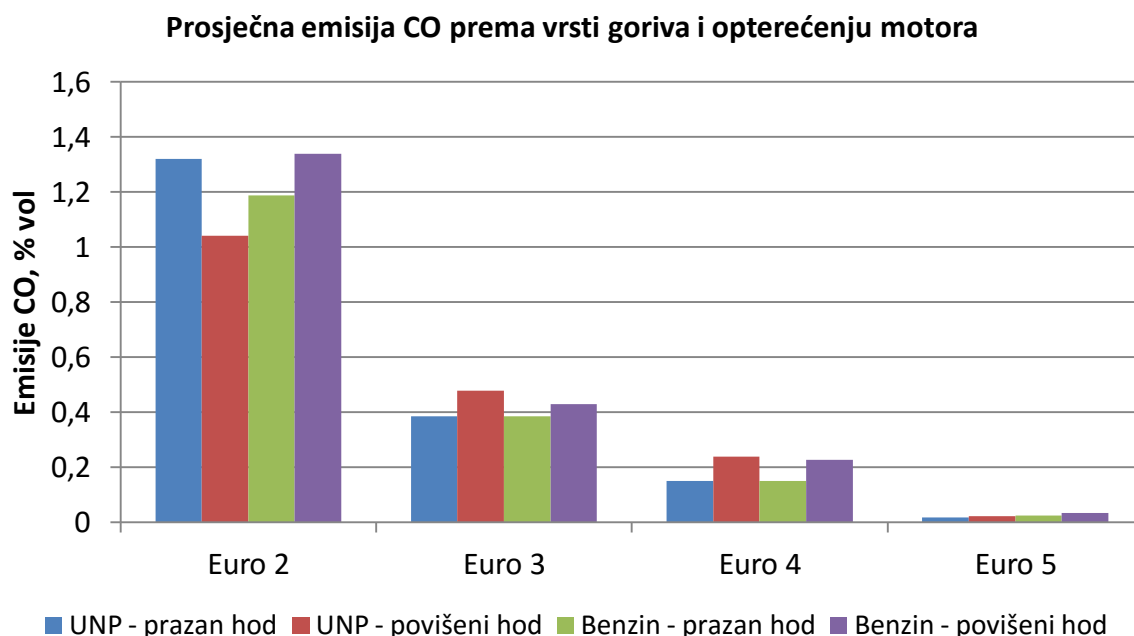


Slika 35. Prosječne izmjerene vrijednosti pri povišenom hodu pri pogonu UNP-om

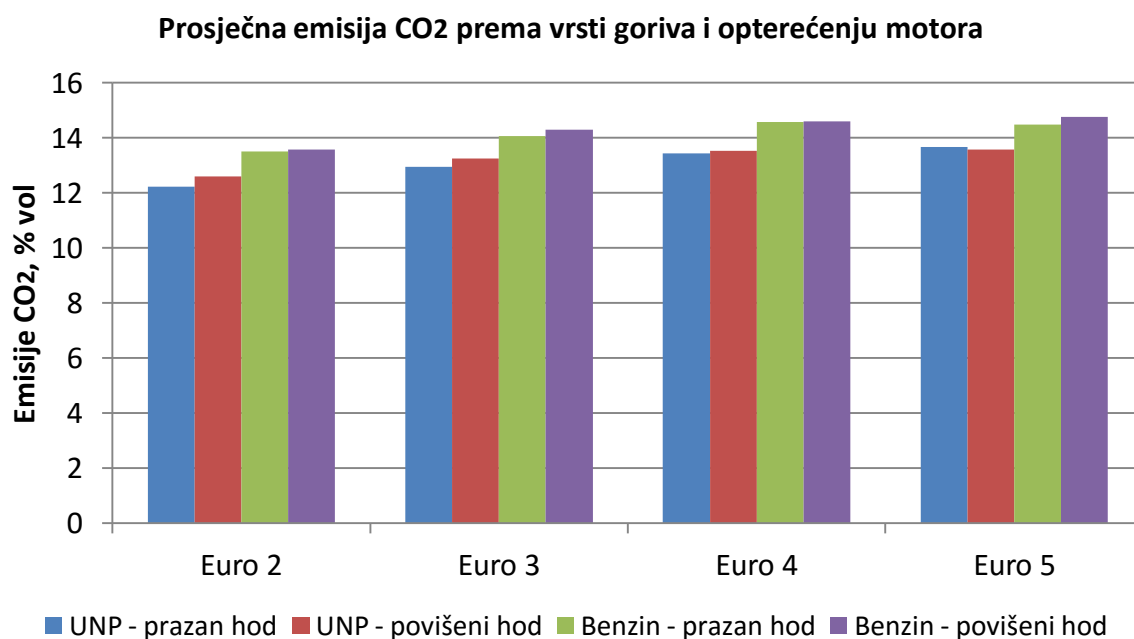


Slika 36. Prosječne izmjerene vrijednosti pri praznom hodu pri pogonu UNP-om

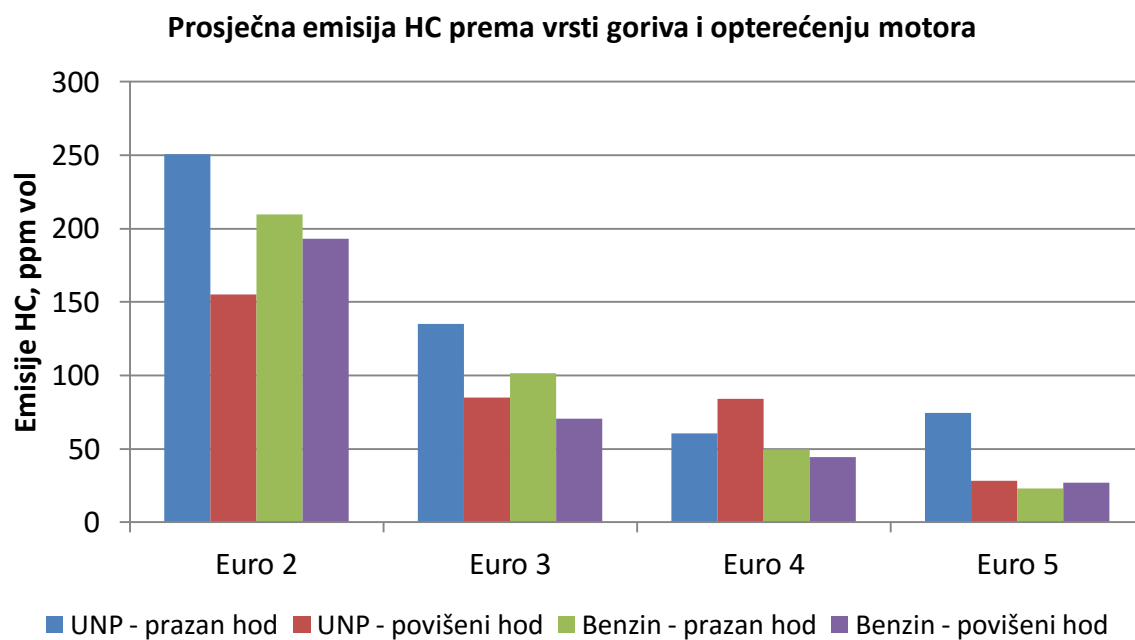
Iz dijagrama 37, 38 i 39 se vidi da vrsta goriva ima utjecaj na emisije. Prema analizi napravljenoj u programskom paketu *Copert*, pokazalo se da vozila s Ottovim motorom pogonjena UNP-om imaju oko 27 % manje emisije CO, oko 13 % manje emisije HC, te oko 2 % veće emisije CO₂ u odnosu na vozila s Ottovim motorom pogonjena benzinom. No, iz analize stvarnih vrijednosti emisija dobivenih mjerenjem za vozila koja zadovoljavaju Euro 2, 3, 4 i 5 norme, vidimo malo drukčiju sliku.



Slika 37. Prosječne izmjerene vrijednosti CO jednog vozila prema vrsti goriva, opterećenju motora i razini ograničenja

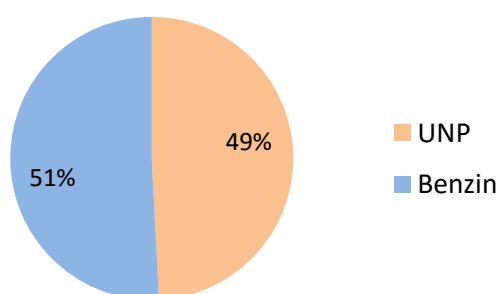


Slika 38. Prosječne izmjerene vrijednosti CO₂ jednog vozila prema vrsti goriva, opterećenju motora i razini ograničenja

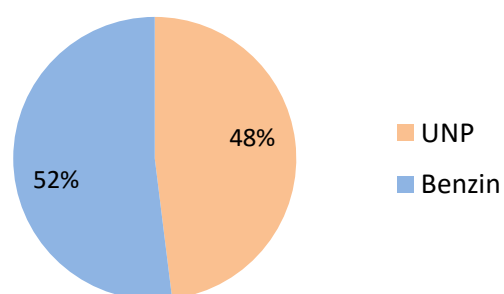


Slika 39. Prosječne izmjerene vrijednosti HC jednog vozila prema vrsti goriva, opterećenju motora i razini ograničenja

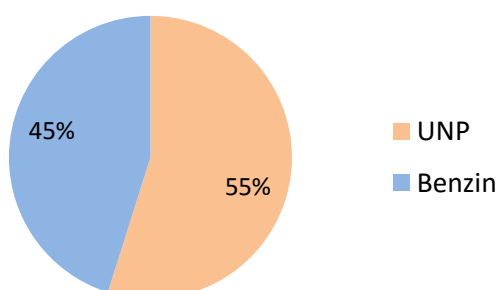
Udio CO prema vrsti pogona, %



Udio CO2 prema vrsti pogona, %



Udio HC prema vrsti pogona, %



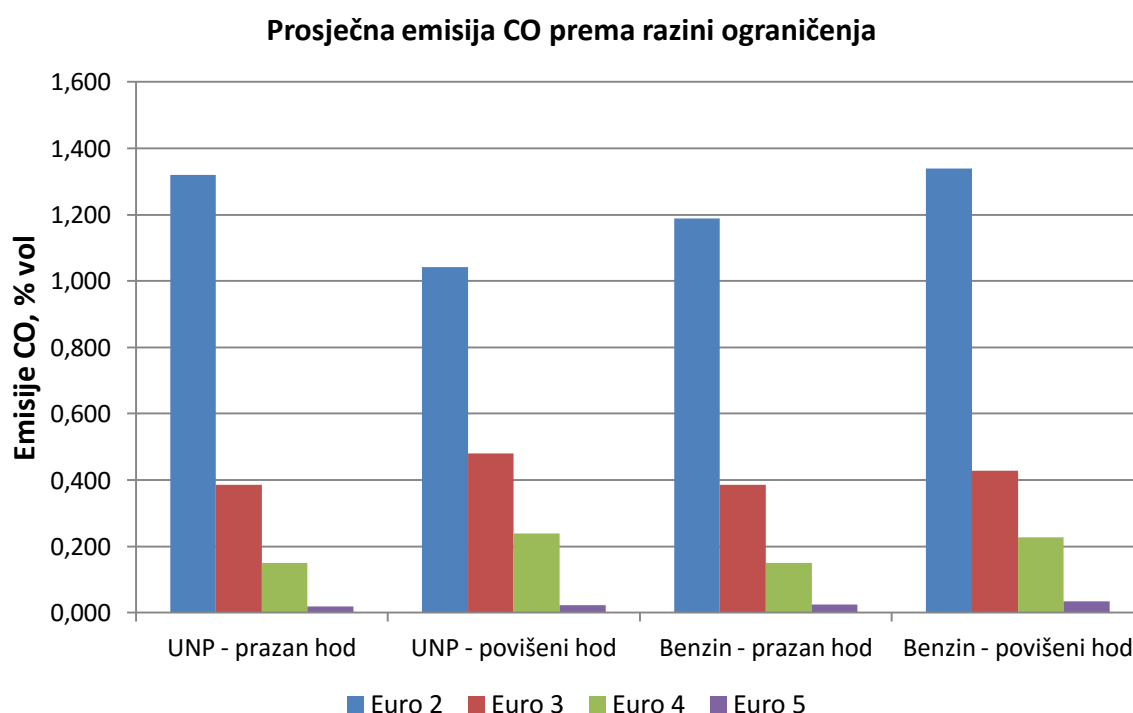
Slika 40. Udio emisija štetnih tvari jednog vozila prema vrsti pogona (Euro 2, 3, 4 i 5)

Vidimo da su emisije CO manje samo 2 %, a emisije CO₂ 4 %, dok su emisije HC veće 10 %. Ovo se kosi sa rezultatima dobivenim analizom u programskom paketu *Copert*.

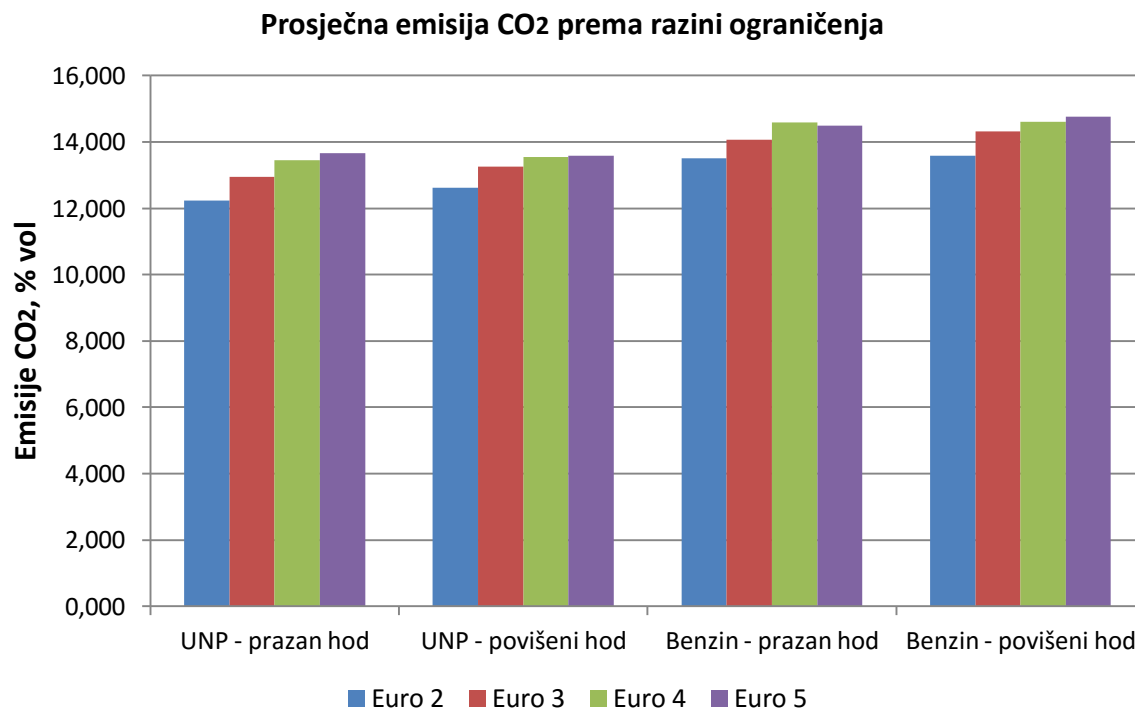
4.2.2 Utjecaj razine ograničenja na emisije ispušnih plinova

Razina ograničenja emisija motora predstavlja najviše dopuštene granice emisija reguliranih štetnih tvari i označava se sa već spomenutim Euro oznakama. Svi proizvođači vozila za cestovni promet namjenjenima europskom tržištu su dužni poštovati te norme, a 2014. godine je uvedena najstroža do sad Euro 6 norma. Kako postaje sve teže zadovoljiti te norme, bitno je da se autoindustrija okrene alternativnim gorivima. Taj proces je već odavno započeo, no i dalje je zastupljenost takvih vozila na vrlo niskoj razini. Stoga je za ispitivanja vozila napravljena analiza utjecaja razine ograničenja emisija pri pogonu s dva različita goriva, konvencionalnim gorivom - benzinom i alternativnim gorivom - UNP-om, pri praznom i povišenom hodu.

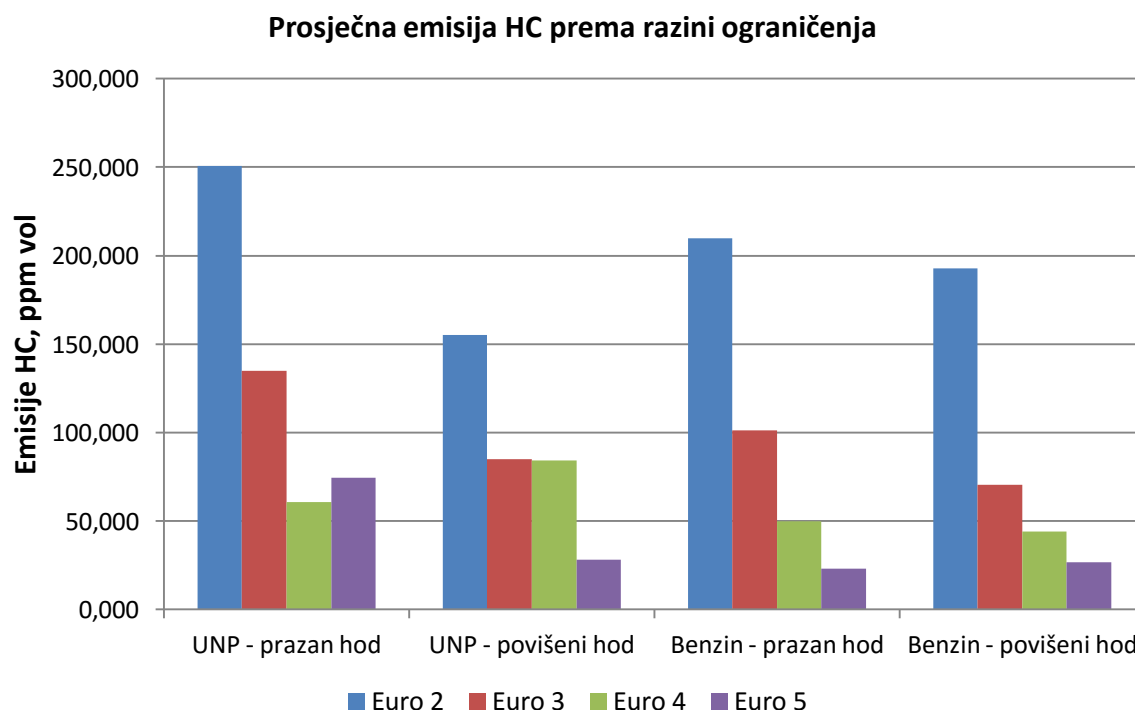
Ako se promotre sljedeći dijagrami jasno se vidi da Euro norme imaju znatan utjecaj na emisije. Iz dijagrama sa slika 41, 42 i 43 može se zaključiti da su se uvođenjem strožih normi emisije CO i HC znatno smanjile, no povećale su se emisije CO₂. Razlog tome je što se u posljednjih 20-ak godina dosta radilo na optimiranju procesa izgaranja, pa je izgaranje potpunije u novijim vozilima zbog rada vozila sa strogo stehiometrijskom smjesom, što rezultira manjim udjelom CO i HC u ispuhu. Također je to rezultat katalizatora koji i onaj dio neizgorenih spojeva CO i HC pretvara u CO₂, te reducira emisije dušikovih oksida.



Slika 41. Prosječna emisija CO jednog vozila prema razini ograničenja



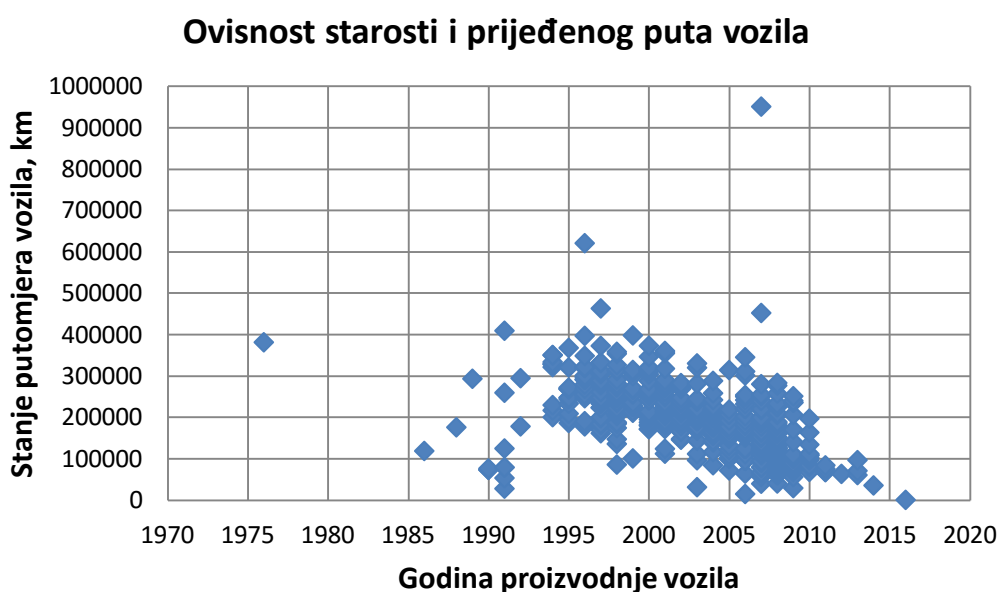
Slika 42. Prosječna emisija CO₂ jednog vozila prema razini ograničenja



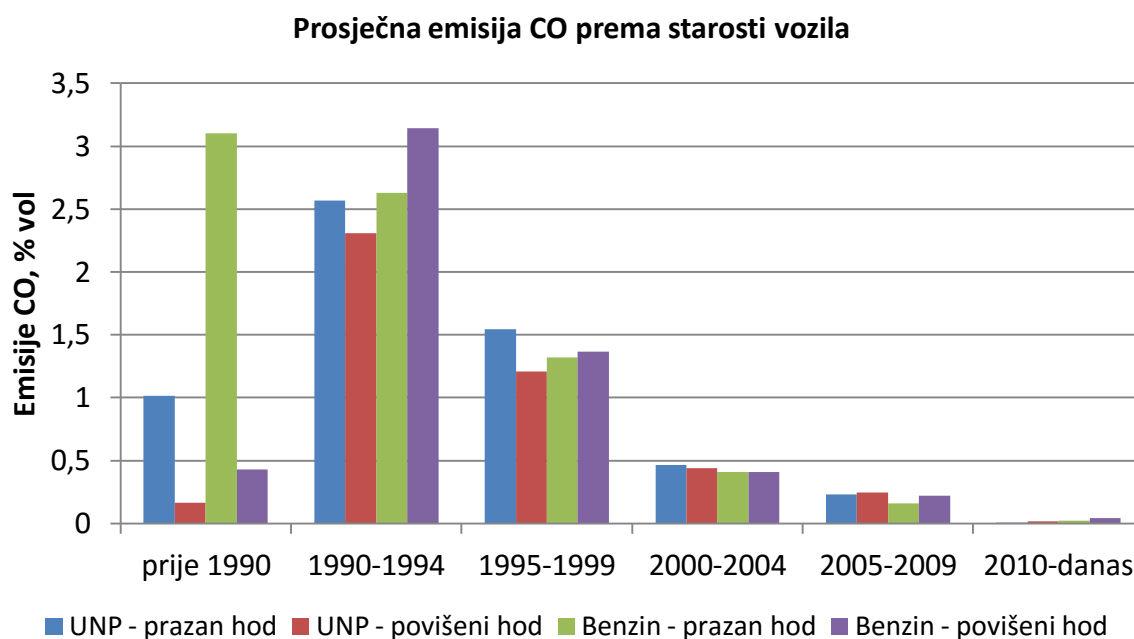
Slika 43. Prosječna emisija HC jednog vozila prema razini ograničenja

4.2.3 Utjecaj starosti i prijeđenog puta vozila na emisije ispušnih plinova

Prosječna starost ispitivanih vozila je preko 13 godina, a prosječan put vozila iznosi 193.752 kilometara, kao što se može vidjeti iz tablice 13. Starost i prijeđeni put vozila su usko povezani sa emisijama štetnih tvari, jer vozilo se starenjem, odnosno vožnjom troši i kviri, te time narušava originalne karakteristike vozila, te povećava potrošnju goriva i emisije štetnih tvari vozila. To se jednostavno ne može izbjeći, a iz dijagrama 35, 36 i 37 se već može vidjeti trend pada emisija štetnih tvari prema starosti vozila preko razine ograničenja vozila, jer novija vozila imaju i strože norme. Ovisnost starosti vozila i prijeđenog puta se može vidjeti na slici 44.



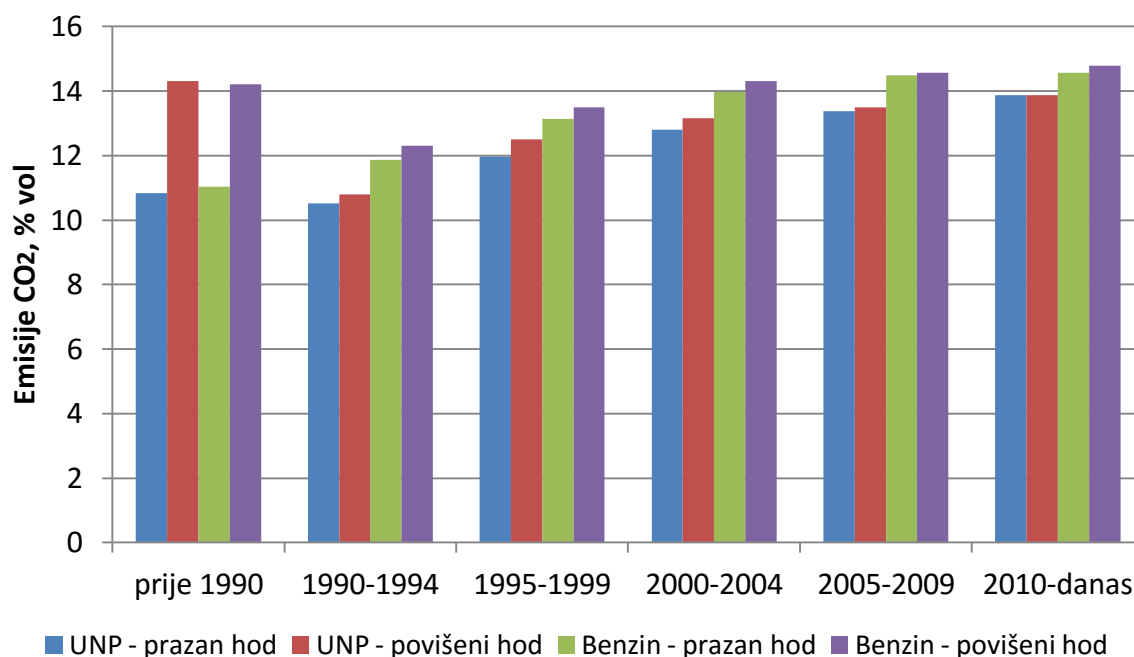
Slika 44. Dijagram ovisnosti starosti i prijeđenog puta svih ispitivanih vozila



Slika 45. Prosječna emisija CO prema starosti vozila

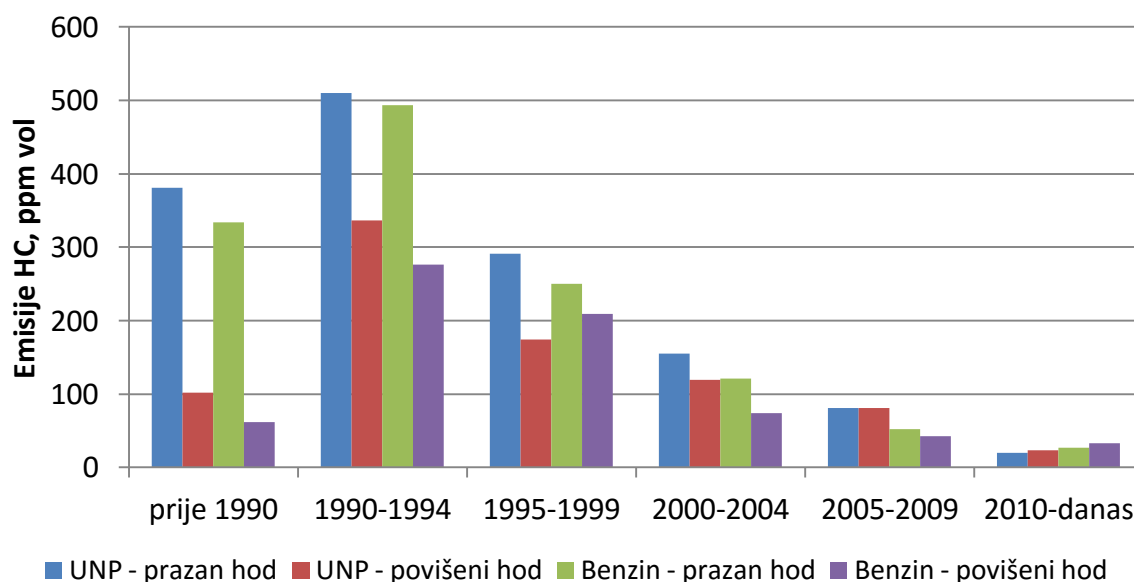
Na dijagramima sa slika 45, 46 i 47 se može vidjeti utjecaj starosti vozila unazad 30-ak godina, te je jasno da su se emisije CO i HC znatno smanjile pojavom novijih vozila, no emisije CO₂ stagniraju ili čak rastu zbog ranije navedenih razloga.

Prosječna emisija CO₂ prema starosti vozila



Slika 46. Prosječna emisija CO₂ prema starosti vozila

Prosječna emisija HC prema starosti vozila



Slika 47. Prosječna emisija HC prema starosti vozila

4.2.4 Analiza prolaznost ispitivanih vozila na Eko testu

Kako je već ranije rečeno, vozila pogonjena plinovitim gorivom nisu obvezna u RH prolaziti Eko test pri redovitom tehničkom pregledu. Razlog tome je poticanje vlasnika vozila na korištenje alternativnih goriva, odnosno u ovom slučaju plinovitih goriva. To je zato što se smatra da takva vozila emitiraju niže emisije štetnih tvari, no iz analiza provedenih na ispitivanim vozilima pokazalo se da u prosjeku jedno vozilo pogonjeno UNP-om emitira samo 2 % manje CO, 4 % manje CO₂, te čak 10 % više HC. Prema tome, postaje upitno trebaju li ovakva vozila biti oslobođena Eko testa.

Ako ne postoje podaci o dopuštenim vrijednostima izmjerenih emisija od proizvođača vozila, tada se koriste zakonski propisane vrijednosti prema [35]. Stoga će se provesti analiza o prolaznosti ispitivanih vozila koja zadovoljavaju Euro 2, 3, 4 i 5 norme prema tim dopuštenim vrijednostima. Sva spomenuta ispitivana vozila imaju katalizator, pa su dopuštene vrijednosti preuzete iz tablice 14. Uvjet za prolaz na Eko testu je da vozilo zadovolji na sva 4 mjerenja; pri pogonu benzinom pri praznom i pri povišenom hodu, te pri pogonu UNP-om pri praznom i pri povišenom hodu.

Tablica 14. Dopuštene izmjerene emisije CO za vozila opremljena katalizatorom [35]

REG-KAT	
pri temperaturi motora $\geq 80^{\circ}\text{C}$	
progrijavanje katalizatora minimalno 1 min	
povećana brzina vrtnje (2500 - 3000 min ⁻¹)	prazni hod
CO $\leq 0,3\%$	CO $\leq 0,5\%$
faktor zraka $\lambda = 1 (\pm 0,03)$	

Tablica 15. Dopuštene izmjerene emisije CO za vozila bez katalizatora [35]

BEZ-KAT	
pri temperaturi motora $\geq 80^{\circ}\text{C}$	
prazni hod	
1986. godina i starija	1987. godina i mlađa
CO $\leq 4,5\%$	CO $\leq 3,5\%$

Tablica 16. Prikaz prolaznosti ispitivanih vozila na Eko testu

Razina ograničenja	Broj ispitivanih vozila	Broj vozila koja zadovoljavaju uvjete	Prolaznost, %
EURO 2	90	18	20,00
EURO 3	95	40	42,11
EURO 4	159	101	63,52
EURO 5	21	16	76,19
Ukupno:	365	175	47,5

Iz tablice 16 je vidljivo da postoji trend rasta prolaznosti s obzirom na razinu ograničenja, odnosno Euro normu koje vozilo zadovoljava, no također se jasno vidi da više od polovice ispitivanih vozila ne bi smjelo proći tehnički pregled prema zakonski propisanim vrijednostima emisija CO, te faktoru pretička zraka λ .

5. Zaključak

Iz svega prikazanog može se zaključiti da je vožnja vozila pogonjenih plinovitim gorivima isplativija od onih na konvencionalna goriva. Plinovita goriva pružaju i niz prednosti u odnosu na konvencionalna goriva, te se smatraju čistijima i ekološki prihvatljivijima od istih.

Iz analize u programskome paketu *Copert* se može zaključiti da starost vozila direktno utječe na emisije pojedinih štetnih tvari iz vozila. Nažalost, Hrvatska se ne može pohvaliti u tom pogledu, jer je prosječna starost osobnih vozila kategorije M1 registriranih u RH 2015. godine iznosila preko 12 godina. Analiza u *Copert-u* je pokazala i smanjenje emisija CO i HC iz vozila pogonjenim UNP-om u odnosu na vozila pogonjena benzinom, dok su razlike između emisija drugih štetnih tvari neznatne.

Iz analize izmjerenih vrijednosti vozila ispitivanih u Centru za vozila Hrvatska doneseni su sljedeći zaključci:

Vrsta goriva ima vrlo mali utjecaj na smanjenje emisija kada pričamo o UNP-u i benzinu. Ukapljeni naftni plin smanjuje emisije CO i CO₂ za tek nekoliko posto u odnosu na benzin, a čak povećava emisije HC, što se kosi sa rezultatima dobivenim iz programskog paketa *Copert*.

Opterećenje motora ima utjecaj na emisije na način da smanjuje emisije CO i HC pri povišenom hodu, a blago povećava emisije CO₂. Razlozi tome su: katalizator ima viši stupanj pretvorbe pri većoj temperaturi, ima viši stupanj pretvorbe kada motor radi u uskom području stehiometrijske gorive smjese, što je slučaj pri povišenom hodu, a ujedno se takvom smjesom postiže i potpunije izgaranje što smanjuje emisije CO i HC.

Razina ograničenja emisija vozila utječe na emisije zbog sve strožih normi, pa su emisije u trendu pada. Isto se može reći i za starost vozila. Dakle, potrebno je pomladiti vozni park RH kako bi se postigla značajnija smanjenja emisija štetnih tvari, jer su obje analize potvrdile da starost vozila ima najveći utjecaj na emisije.

Analiza je također dovela u pitanje ispravnost odluke o oslobađanju vozila pogonjenih UNP-om i SPP-om od Eko testa. Naime, više od polovice ispitivanih vozila nije zadovoljilo uvjete za prolaz na Eko testu prema zakonski propisanim vrijednostima.

Iz svega navedenog može se zaključiti da UNP i nije toliko čistije gorivo koliko se to možda mislilo, no svakako je isplativije i ima neke prednosti u pogledu dugotrajnosti motora. No, bez obzira na to, ne bi se trebalo odustati od ovakvih vozila, jer se iz dana u dan razvijaju nove tehnologije koje sa gorivom poput UNP-a imaju potencijal zamjeniti konvencionalna fosilna goriva. Možda najbolja opcija leži u prirodnome plinu, odnosno metanu i obnovljivom izvoru energije biometanu. Brojne studije su pokazale da ovo gorivo izgara puno čistije od svih ostalih fosilnih goriva, uključujući i ukapljeni naftni plin, stoga ne bi

trebalo biti iznenađenje vidjeti ovo gorivo kao pogonsko gorivo motornih vozila u mnogo široj primjeni nego što je to danas.

Na kraju krajeva, mi smo ti koji moramo živjeti u ovome svijetu i udisati zrak koji zagađujemo, a porast vozila u cestovnom prometu raste svakim danom, te je potrebno učiniti više kako bi spriječili narušavanje prirodne ravnoteže i zdravlja ljudi. Stoga smatram da je jedna od metoda smanjenja onečišćenja upravo okretanje alternativnim gorivima poput UNP-a, SPP-a i UPP-a.

6. Popis literature

- [1] Mahalec I., Lulić Z., Kozarac D., Motori s unutarnjim izgaranjem, FSB Zagreb, 2010.
- [2] <http://ec.europa.eu>
- [3] <http://www.afdc.energy.gov>
- [4] <http://economictimes.indiatimes.com/auto-technology/gas-powered-cars-cng-vs-lpg/articleshow/39357829.cms>
- [5] <http://www.mylpg.eu>
- [6] <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>
- [7] <https://en.wikipedia.org>
- [8] Sigurnosno-tehnički list: Ukapljeni naftni plinovi trgovački: propan, butan, propan-butan smjesa i UNP za automobile, izdanje: 1/1/08, INDUSTRIJA NAFTE d.o.o.
- [9] http://inspectapedia.com/plumbing/Gas_Pressures.php
- [10] http://www.total.co.in/lpg-b2c/know-more-about-totalgaz-b2c/technical_specification.html
- [11] <http://www.thomgas.hr>
- [12] Laurencas Raslavičius, Artūras Keršys, Saulius Mockus, Neringa Keršienė, Martynas Starevičius: Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport, Elsevier Ltd, 2014.
- [13] <http://www.engineeringtoolbox.com>
- [14] <http://www.svijet-kvalitete.com>
- [15] <http://www.slideshare.net/ajitthorat/octane-and-cetane-numbers>
- [16] <http://web.archive.org/web/20100825042309/http://www.ior.com.au/ecflist.html>
- [17] <http://www.gpz-opskrba.hr/default.aspx?id=153>
- [18] http://www.beg.utexas.edu/energyecon/lng/LNG_introduction_07.php

-
- [19] <http://unitrove.com/engineering/tools/gas/natural-gas-density>
- [20] www.ups.com
- [21] <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c15/Fuel%20properties.pdf>
- [22] Podaci dobiveni iz Centra za vozila Hrvatska, CVH, 2016.
- [23] <http://www.lovatogas.com>
- [24] <http://www.elgas.com.au/blog/681-liquid-injection-lpg-vs-vapour-injection-conversions>
- [25] <http://www.fleetsandfuels.com/category/fuels/dual-fuel-fuels/>
- [26] <http://www.solarisdiesel.eu/en/solaris-diesel-dual-fuel-2/>
- [27] <http://www.evollng.com.au/transport/on-road/lng-truck-technology/system-features-and-overview>
- [28] <https://www.ngvamerica.org/natural-gas/environmental-benefits/>
- [29] <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=73&t=11>
- [30] <http://cngeurope.com/>
- [31] <http://www.extraordinaryroadtrip.org/research-library/technology/liquified-petroleum/ad-draw.asp>
- [32] <http://www.mzoip.hr>
- [33] <http://www.zakon.hr/z/244/zakon-o-cestama>
- [34] <http://www.adesystems.co.uk/garage-equipment/bea-emissions-analysers/bea-unit/103/bea-350>
- [35] http://www.poslovniforum.hr/zakoni/pravilnik_tp.asp